

**Katarzyna GRZESIK-WOJTYSIAK<sup>1</sup>**

## **OCENA MODELU IWM-PL – POLSKIEJ APLIKACJI DO ANALIZY CYKLU ŻYCIA SYSTEMÓW GOSPODARKI ODPADAMI<sup>2</sup>**

Analiza cyklu życia - LCA jest techniką oceny aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów środowiskowych, stosowaną również do oceny systemów gospodarki odpadami. Do tej pory opracowano kilkanaście narzędzi służących do modelowania wpływu na środowisko systemów gospodarki odpadami. W 2011 r. wydano pierwszą polsko-języczną aplikację, model IWM-PL. W artykule poddano ocenie model IWM-PL, przeprowadzając analizę cyklu życia dla systemu gospodarki odpadami komunalnymi dla Krakowa. Zaprezentowano strukturę wymaganych do wprowadzania danych tj. analizę zbioru, jak również otrzymane wyniki oceny wpływu cyklu życia. Granice systemu analizy są zdefiniowane jako wszystkie procesy odzysku i unieszkodliwiania odpadów, dokonywane w Krakowie (poza recyklingiem surowców wtórnych), transport zebranych odpadów do instalacji odzysku i unieszkodliwiania odpadów (sortownia, zakład demontażu odpadów wielkogabarytowych, kompostownia, składowisko), a także transport odzyskanych surowców wtórnych z sortowni do zakładów recyklingu. Budowa instalacji gospodarki odpadami jest wyłączona z granic systemu, natomiast paliwo i energia potrzebna do funkcjonowania instalacji znajduje się w granicach systemu. Metodyka oceny wpływu cyklu życia w modelu IWM-PL jest oparta o Eco-indicator 99. W artykule opisano kategorie wpływu stosowane w metodyce Eco-indicator 99, ujęte w trzy kategorie szkody: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu oraz zasoby naturalne oraz porównano z kategoriami wpływu stosowanymi w modelu IWM-PL. Za pomocą modelu obliczono emisje do powietrza i wody, a następnie przekształcono w 6 kategorii wpływu. Końcowy wynik całkowitego wpływu na środowisko, systemu gospodarki odpadami komunalnymi został wyrażony w Eco-punktach (Pt) w dwóch kategoriach szkody tj. zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu.

**Słowa kluczowe:** analiza cyklu życia (LCA), wpływ na środowisko, gospodarka odpadami komunalnymi

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Katarzyna Grzesik-Wojtysiak, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: 12 6174498, grzesikk@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Pracę zrealizowano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.008

## 1. Wprowadzenie

Analiza cyklu życia (Life Cycle Assessment - LCA) jest techniką oceny aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów środowiskowych, pierwotnie opracowaną dla oceny cyklu życia produktu. LCA umożliwia ocenę wpływów środowiskowych wynikających ze wszystkich etapów życia produktu, począwszy od wydobycia zasobów naturalnych, ich przetwarzania, poprzez wytwarzanie produktu (proces produkcji), użytkowanie, powtórne użycie, recykling aż po ostateczne unieszkodliwianie odpadów, tj. „od kołyski po grób” lub „od kołyski po kołyskę”. Przeprowadzanie analizy cyklu życia zgodnie z normą ISO 14040 [9] składa się z czterech faz: 1) cel i zakres badań, 2) analiza zbioru (inwentaryzacja danych), 3) ocena wpływu cyklu życia oraz 4) interpretacja.

Analiza cyklu życia może być także stosowana do oceny aspektów i wpływów środowiskowych związanych z systemem gospodarki odpadami. Cykl życia odpadu rozpoczyna się z chwilą, kiedy produkt staje się bezużyteczny i jest wyrzucony do kosza na śmieci („kołyska”), a kończy, kiedy odpad jest ostatecznie deponowany na składowisku („grób”), powodując emisje do powietrza, wody i gleby, lub kiedy odpad jest przetworzony ponownie w użyteczną materię lub energię („kołyska”).

Przeprowadzanie analizy cyklu życia jest procesem trudnym, skomplikowanym i złożonym, wymagającym wielu, bardzo dokładnych danych (baz danych), a także metodyk modelujących mechanizmy środowiskowe oraz efekty powodowane przez uwalniane emisje. Dlatego analizę cyklu życia prowadzi się z zastosowaniem specjalnie opracowanych modeli. Do wykonywania badań analizy cyklu życia systemów gospodarki odpadami opracowano kilkanaście modeli [6] m.in.: IWM-2, ORWARE, WISARD, WRATE, EASEWASTE, LCA-IWM.

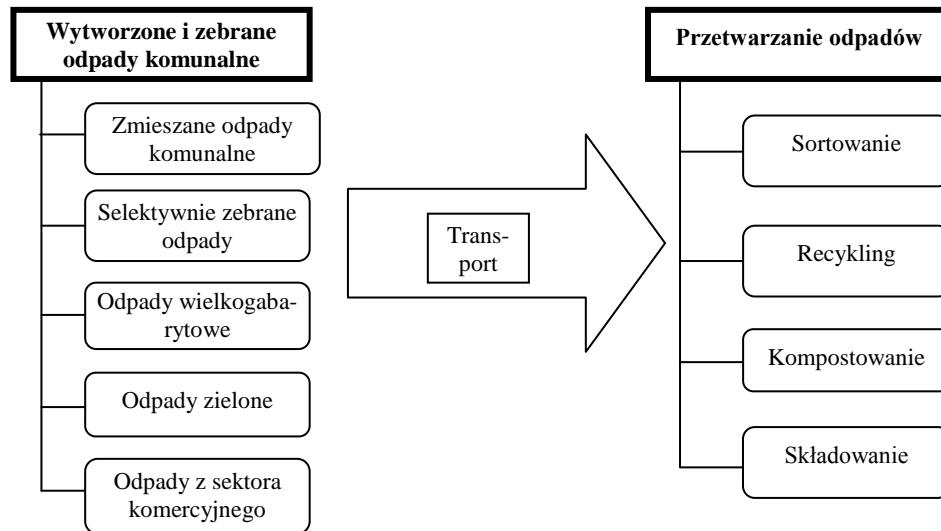
W 2011 roku wraz z publikacją: Ocena systemu gospodarki odpadami [8] wydano pierwszą polskojęzyczną aplikację IWM-PL służącą do oceny systemów gospodarki odpadami komunalnymi. IWM-PL umożliwia kwantyfikację potencjalnych wpływów środowiskowych, z zastosowaniem metodyki analizy cyklu życia (LCA), jak również aspektów ekonomicznych.

W artykule poddano ocenie model IWM-Pl, wyłącznie w zakresie wpływów środowiskowych, przeprowadzając analizę cyklu życia dla systemu gospodarki odpadami komunalnymi dla Krakowa.

## 2. Cel i zakres badań: granice systemu, jednostka funkcjonalna

Celem badań jest kwantyfikacja wpływów środowiskowych powodowanych przez system gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie, stan w roku 2010. Jednostką funkcjonalną jest ogólna ilość odpadów komunalnych wprowadzonych do systemu gospodarki odpadami. Jednostka funkcjonalna

obejmuje odpady zmieszane, odpady selektywnie zbierane, odpady wielkogabarytowe, zielone oraz odpady z infrastruktury (sektora komercyjnego) zebrane w ciągu całego roku i przekazane do przetwarzania. Granice systemu są definiowane jako wszystkie procesy odzysku i unieszkodliwiania dokonywane w instalacjach w Krakowie, jak również poza Krakowem (recykling surowców wtórnych). Budowa instalacji odzysku i unieszkodliwiania jest wyłączona z granic systemu. Granice systemu przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1. Granice systemu analizy**

Fig. 1. System boundaries of the analysis

### 3. Analiza zbioru

W fazie analizy zbioru (Life Cycle Inventory - LCI) dokonuje się inwentaryzacji wszystkich wejść i wyjść do systemu tj. pobranych ze środowiska zasobów oraz uwolnionych do środowiska emisji, ale także energii, użytecznych materiałów, produktów itd. W analizie zbioru wymagane jest zebranie, obliczenie znaczącej ilości danych i wprowadzenie, w odpowiedni sposób, do modelu.

#### 3.1. Struktura wprowadzania danych do modelu

##### Zbiórka odpadów

W pierwszym kroku do modelu IWM-PL wprowadza się ilość zmieszanych odpadów komunalnych oraz ich skład morfologiczny, z podziałem na papier szkło, tworzywa sztuczne, tekstylia oraz odpady organiczne. Wprowa-

dzane dane pochodzą z „Raportu badań ilości i struktury odpadów komunalnych Krakowa”, prowadzonych od listopada 2010 do października 2011 [10] oraz „Sprawozdania z realizacji planu gospodarki odpadami za lata 2009-2011” [1].

**Tabela 1. Ilość i skład niesegregowanych odpadów komunalnych wprowadzonych do systemu**

Table 1. Quantity and composition of residual waste introduced into the system

<b>Całkowita ilość niesegregowanych odpadów komunalnych [Mg]</b>	255 761,36
<b>Skład odpadów [%]</b>	
Papier	20,48
Szkło	8,53
Metale	2,25
Tworzywa sztuczne	14,59
Tekstyliia	2,93
Organiczne	29,22
Inne	22,00
<b>Ilość metali [%]</b>	
Metale żelazne	70,00
Metale nieżelazne	30,00
<b>Ilość tworzyw sztucznych [%]</b>	
Tworzywa sztuczne miękkie	50,00
Tworzywa sztuczne twarde	50,00

W drugim kroku wprowadza się dane nt. zbiórki odpadów wielkogabarytowych. Jest to proces uciążliwy, bowiem nie można podać ogólnej ilości zebranych odpadów wielkogabarytowych, a wymagane jest dokładne oszacowania ich składu morfologicznego i podanie ilości poszczególnych frakcji: szkła, metali żelaznych, nieżelaznych, tworzyw sztucznych miękkich, tworzyw sztucznych twardych oraz innych w kg. Ponadto w składzie morfologicznym odpadów wielkogabarytowych nie uwzględniono drewna - dominującego składnika odpadów meblowych.

Trzeci i czwarty krok dotyczy odpadów selektywnie zebranych. Do modelu wprowadza się ilości odpadów (w kg) zebranych w pojemnikach indywidualnych (dzwonach): papieru, szkła, metali żelaznych, metali nieżelaznych, tworzyw sztucznych miękkich, tworzyw sztucznych twardych, tekstyliów, organicznych. W funkcjonujących systemach zbiórki metale są zbierane do jednego pojemnika (bez podziału na żelazne i nieżelazne), jak również tworzywa sztuczne są zbierane do jednego pojemnika, bez rozróżniania tworzyw twardych i miękkich. Krok ten wymaga oszacowania udziału metali żelaznych i nieżelaznych w zebranych metalach oraz tworzyw twardych i miękkich w zebranych tworzywach. W modelu IWM-PL założono, że odpady zebrane w dzwonach

przekazywane są bezpośrednio do recyklingu (bez uzdatniania, doczyszczania). W rzeczywistości rozwiązanie takie jest rzadko stosowane. W Krakowie selektywnie zebrane odpady w dzwonach, przekazywane są do sortowni odpadów selektywnie zebranych. Dopiero po procesie sortowania, wydzielone surowce wtórne transportowane są do poszczególnych instalacji recyklingu. Dlatego zebrane w Krakowie surowce wtórne do dzwonów, wprowadzono do modelu IWM-PL, jako odpady zbierane do wspólnych pojemników, z przeznaczeniem do procesu sortowania.

#### Sortowanie

Wprowadzanie danych do sekcji: stacja demontażu odpadów wielkogabarytowych nie jest zadaniem łatwym, struktura wymaganych danych jest nie-spójna. Należy podać ilość odzyskanych materiałów wtórnych w % (myląc tytuł w stosunku do zastosowanych jednostek), co wymaga wcześniejszej precyzyjnych obliczeń. W sekcji tej podaje się również zużycie oleju napędowego przy transporcie odzyskanych materiałów do miejsca zagospodarowania. Konieczne są wcześniejsze założenia i obliczenia dotyczące odległości pomiędzy stacją demontażu, a instalacjami recyklingu, ładowności samochodów ciężarowych oraz średniego zużycia paliwa na 100km. Zagospodarowanie balastu po procesie wprowadza się w %, przy czym są możliwe dwie opcje: termiczne przetwarzanie oraz składowanie. Transport balastu wymaga podania dystansu do instalacji termicznego przekształcania lub składowania.

Segregacja materiałów uzyskanych z selektywnej zbiórki – pojemników wspólnych, wymaga podania średniego zużycia paliwa w litrach na tonę zebranych odpadów (konieczność wcześniejszych obliczeń i założeń), przy transporcie odpadów do sortowania oraz parametrów bilansu paliwowo – energetycznego instalacji sortowania: zużycia energii elektrycznej i paliwa na tonę odpadów, a także zagospodarowania balastu po procesie (termiczne przekształcanie lub składowanie) wraz z określeniem dystansu przy transporcie balastu.

#### Przetwarzanie odpadów

Proces produkcji paliwa alternatywnego RDF, w modelu IWM-PL, jest możliwy jedynie ze zmieszanych odpadów komunalnych, a taki proces nie był realizowany w Krakowie w roku 2010. Paliwo alternatywne było produkowane z balastu po procesie sortowania selektywnie zebranych odpadów oraz z rozdrobnionych odpadów wielkogabarytowych – mebli. Wprowadzenie rzeczywistego procesu do modelu IWM-PI nie było możliwe. Dlatego do modelu IWM-PL wprowadzono termiczne przetwarzanie, dla obliczonej ilości wytworzonego paliwa alternatywnego, co jest znacznym uproszczeniem. Termiczne przetwarzanie w modelu IWM-PL jest dedykowane dla spalarni odpadów, natomiast paliwo alternatywne wytwarzane w Krakowie było spalane w piecach cementowych. Opcja spalania w piecach cementowych w modelu IWM-PL nie jest możliwa.

Wprowadzanie do modelu danych dotyczących procesu biologicznego przetwarzania, a w przypadku Krakowa - kompostowania, jest przejrzyste. Mo-

del wymaga podania procentowego ubytku masy odpadów w procesie, zużycia energii elektrycznej na tonę kompostowanych odpadów oraz sposobu zagospodarowania balastu po procesie.

Proces składowania, w modelu IWM-PL, wymaga określenia bilansu paliwo-energetycznego składowiska tj. zużycia energii elektrycznej i paliwa na tonę składowanych odpadów oraz wprowadzenia danych dotyczących gazu i odcieków: odzysku gazu składowiskowego, odzysku energii z gazu, efektywności odzysku energii elektrycznej, odzysku odcieków i efektywności unieszkodliwiania odcieków; wyrażanych w procentach. Wymagane parametry odnoście gazu i odcieków są sformułowane nieprecyzyjnie i niejasno. Brak jest wystarczających wyjaśnień: co oznacza odzysk gazu składowiskowego; czy jest to ilość ujmowanego gazu w stosunku do wytwarzanego; co oznacza odzysk energii z gazu składowiskowego, co oznacza efektywność odzysku energii elektrycznej; czy odzysk odcieków oznacza zawracanie odcieków na składowisko czy oznacza ujmowanie odcieków. Określenia parametrów wprowadzanych w procesie składowania budzą wiele wątpliwości i zastrzeżeń. Z drugiej strony, końcowy wynik analizy cyklu życia zależy w dużej mierze od wprowadzonych wartości parametrów do procesu składowania. Ponieważ składowanie pozostaje nadal dominującą metodą zagospodarowania odpadów komunalnych.

### 3.2. Emisje do powietrza i wody

Model IWM-PL, po wprowadzeniu wymaganych danych, oblicza emisje do wody i powietrza. Dla każdej substancji wyniki podane są w jednakowych jednostkach tj. w kg, nawet wtedy gdy zwyczajowo parametr wyrażany jest w innych jednostkach np. ChZT. W tabeli 2 przedstawiono emisje do powietrza z procesów przetwarzania i transportu odpadów.

Wartości dodatnie w tabeli oznaczają niekorzystny wpływ na środowisko, podczas gdy wartości ujemne wskazują na korzystny wpływ na środowisko tzw. „uniknięte wpływy”. Substancją emitowaną w największych ilościach jest CO<sub>2</sub>, pochodzący ze wszystkich procesów przetwarzania i transportu. Emisje CO<sub>2</sub> mogą być wyjaśnione poprzez:

- zapotrzebowanie na energię elektryczną w procesach przetwarzania (urządzenia elektryczne), produkcja energii elektrycznej w Polsce opiera się głównie o spalanie węgla;
- spalanie paliwa w czasie transportu;
- emisję gazu składowiskowego, którymi głównymi składnikami są metan i CO<sub>2</sub>.

Wartości ujemne emisji: CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> mogą być wyjaśnione jako „uniknięte wpływy”. Przetwarzanie surowców wtórnych w procesie recyklingu wymaga mniej energii niż produkcja materiałów i przedmiotów z surowców pierwotnych. Wartości ujemne emisji dla procesu składowania można wyjaśnić

poprzez wykorzystanie ujmowanego biogazu do produkcji energii elektrycznej i ciepłej na składowisku odpadów komunalnych Barycz.

**Tabela 2. Emisje do powietrza z procesów przetwarzania i transportu odpadów**

Table 2. Emissions to air from waste treatment processes

Emisje do powietrza	Jed.	Trans-port	Sortowanie	Produkcja paliwa RDF	Biologiczne przetwarzanie	Termiczne przetwarzanie	Składowanie	Recykling	Suma
Pyły	kg	12	539	0	833	342	-40157	-12428	-50859
CO	kg	160	339	0	60	27	24908	-8339	17154
CO <sub>2</sub>	kg	29166	380397	0	525327	3232052	37234028	-10112862	31288108
CH <sub>4</sub>	kg	36	829	0	1229	0	5281673	-13249	5270518
NO <sub>x</sub>	kg	525	1653	0	1070	444	-25470	-21120	-42898
N <sub>2</sub> O	kg	0	2	0	3	0	-152	-428	-575
SO <sub>x</sub>	kg	44	1564	0	2388	983	-114416	-52686	-162123
HCl	kg	0	83	0	133	55	-5339	-1328	-6397
HF	kg	0	8	0	13	0	-445	-13	-437
H <sub>2</sub> S	kg	0	0	0	0	0	2727	12	2739
Węglowodory	kg	0	0	0	0	0	28701	0	28701
Węglowodory chlorowane	kg	0	0	0	0	0	728	0	728
Dioksyny/Furany	kg	0	0	0	0	0	0	0	0
Amoniak	kg	0	1	0	2	0	-82	60	-19
Arsen	kg	0	0	0	0	0	0	-361	-361
Kadm	kg	0	0	0	0	0	0	0	0
Chrom	kg	0	0	0	0	0	0	0	0
Miedź	kg	0	0	0	0	0	0	0	0
Ołów	kg	0	0	0	0	0	-3	275	272
Magnez	kg	0	0	0	0	0	-2	-1	-2
Rteć	kg	0	0	0	0	0	-1	0	-1
Nikiel	kg	0	0	0	0	0	-8	-8	-16
Cynk	kg	0	0	0	0	1	-7	-2	-8

W tabeli 3 przedstawiono emisje do wody z procesów przetwarzania i transportu odpadów.

**Tabela 3. Emisje do wody z procesów przetwarzania i transportu odpadów**

Table 3. Emissions to water from waste treatment processes

Emisje do powietrza	Jed.	Transport	Sortowanie	Produkcja paliwa RDF	Biologiczne przetwarzanie	Termiczne przetwarzanie	Składowanie	Recykling	Suma
BZT	kg	0	0	0	1290	-	73649	4836	79775
ChZT	kg	0	1	0	2184	-	73588	-186108	-110335
Zawiesiny	kg	36	60	0	20	-	236	-30135	-29783
OWO	kg	0	4	0	6	-	-212	11524	11322
AOX	kg	0	0	0	0	-	90	-1917	-1827
Węglowodory chlorowane	kg	0	0	0	0	-	0	0	0
Dioksyny/Furany	kg	0	0	0	0	-	0	0	0
Fenole	kg	0	0	0	0	-	15	-6	10
Al	kg	0	164	0	265	-	-12997	-2558	-15125
NH4+	kg	0	1	0	224	-	925	-174	975
Arsen	kg	0	0	0	1	-	-26	-5	-30
Bar	kg	0	14	0	22	-	-1068	-269	-1303
Kadm	kg	0	0	0	0	-	0	-1	-1
Chlorki	kg	333	1552	0	1782	-	-73636	-14312	-84281
Chrom	kg	0	2	0	3	-	-128	-27	-150
Miedź	kg	0	1	0	1	-	-63	-10	-71
Cyjanki	kg	0	0	0	0	-	0	0	0
Fluorki	kg	0	0	0	0	-	18	0	17
Żelazo	kg	0	316	0	508	-	-20639	-3213	-23028
Ołów	kg	0	1	0	1	-	-63	-17	-78
Rtęć	kg	0	0	0	0	-	0	0	0
Nikiel	kg	0	1	0	1	-	-58	-13	-69
Azotany (V)	kg	0	4	0	6	-	-315	3286	2981
Fosforany	kg	0	10	0	16	-	-780	-70	-824
Siarczany	kg	12	1307	0	2083	-	-101730	2596	-95733
Siarczki	kg	0	0	0	0	-	0	-1	-1



Obliczone w modelu IWM-PL wartości emisji do wody są zdumiewające. O ile ujemne wartości emisji dla procesu recyklingu są zrozumiałe („uniknięte wpływy”), o tyle wartości ujemne dla procesu składowania emisji: siarczanów, chlorków, żelaza, aluminium i innych substancji są niewytłumaczalne. Proces deponowania odpadów komunalnych na składowiskach odpadów komunalnych generuje odcieki o ogromnym ładunku substancji zanieczyszczających, zwłaszcza parametrów wymienionych powyżej [5, 7, 12]. Odcieki ze składowiska Barycz w Krakowie są ujmowane i przekazywane do miejskiej oczyszczalni ścieków, niemniej jednak efektywność oczyszczania nie jest równa 100%. Wartości ujemnych emisji do wód z procesu składowania nie można wytłumaczyć w logiczny sposób.

#### 4. Ocena wpływu cyklu życia

Ocena wpływu cyklu życia (Life cycle impact assessment - LCIA) jest fazą LCA, w której dokonuje się ewaluacji potencjalnych wpływów na środowisko i zdrowie ludzi powodowanych przez wejścia i wyjścia do systemu, tj. wyniki analizy zbioru. Szeroko stosowaną metodyką w ocenie wpływu cyklu życia jest Eko-indykator 99. W metodyce tej rozpatruje się trzy kategorie szkody dla: zdrowia ludzi, jakości ekosystemu i zasobów naturalnych. Do każdej kategorii szkody przypisanych jest kilka kategorii wpływu. Kategorie szkód i odpowiadające im kategorie wpływu [2] przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4. Kategorie szkody i kategorie wpływu w metodyce Eko-indykator 99 [2]**

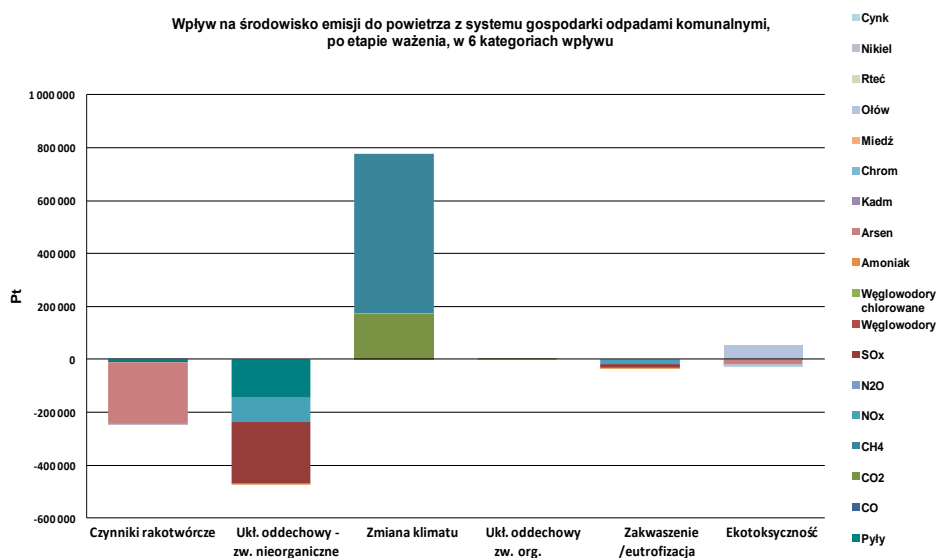
Table 4. Damage categories and impact categories in Eco-indicator 99 methodology [2]

<b>Kategoria szkody</b>	<b>Kategoria wpływu</b>
Zdrowie ludzkie	Efekty kancerogenne u ludzi (Czynniki rakotwórcze)
	Zaburzenia oddechowe powodowane przez związki organiczne (Układ oddechowy – związki organiczne)
	Zaburzenia oddechowe powodowane przez związki nieorganiczne (Układ oddechowy – związki nieorganiczne)
	Szkody powodowane przez zmiany klimatyczne (Zmiany klimatu)
	Szkody powodowane przez promieniowanie jonizujące (Promieniowanie)
	Efekty powodowane przez zubożenie warstwy ozonowej (Warstwa ozonowa)
Jakość ekosystemu	Szkody powodowane przez efekty ekotoksyczne (Ekotoksyczność)
	Szkody powodowane przez efekty zakwaszenia i eutrofizacji (Zakwaszenie/eutrofizacja)
	Szkody powodowane przez użytkowanie i przekształcenie terenu (Użytkowanie terenu)
Zasoby	Szkody powodowane przez wydobycie minerałów (Minerały)
	Szkody powodowane przez wydobycie paliw kopalnych (Paliwa kopalne)

W modelu IWM-PL nie zastosowano pełnej metodyki Eko-indyktor 99, a jedynie w granicznym zakresie. Nie uwzględniono kategorii szkody: zasoby naturalne. Natomiast dwie pozostałe kategorie szkody są okrojone. W kategorii szkody: zdrowie ludzkie nie uwzględniono promieniowania i zubożenia warstwy ozonowej, a w kategorii szkody: jakość ekosystemu nie uwzględniono użytkowania terenu.

Emisje do powietrza i wody, obliczone w poprzednim etapie, są przekształcane w 6 kategorii wpływu: czynniki rakotwórcze, układ oddechowy – związki nieorganiczne, układ oddechowy – związki organiczne, zmiana klimatu, zakwaszenie/eutrofizacja, ekotoksyczność. Wartości we wszystkich kategoriach wpływu są wyskalowane do 100%; jest to etap charakteryzowania. W następnym etapie, którym jest normalizacja, wartości poszczególnych kategorii wpływu są dzielone przez wspólną wartość odniesienia, a w etapie ważenia, znormalizowanym wartościom kategorii wpływu przypisywane są wagi.

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono wpływ na środowisko emisji do powietrza oraz emisji do wody, w 6 kategoriach wpływu, po etapie ważenia, z systemu gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie.

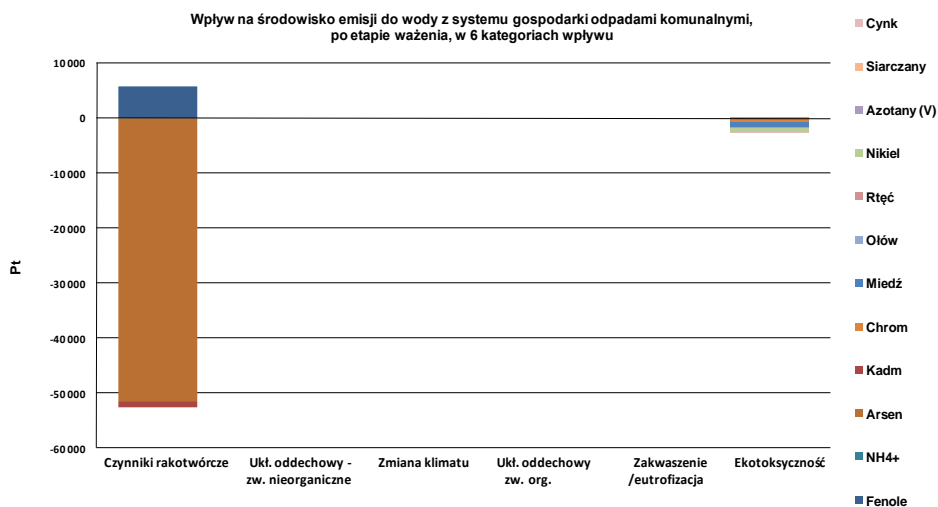


**Rys. 2. Wpływ na środowisko emisji do powietrza**

Fig. 2. Environmental impact of emissions to air

Wartości trzech kategorii wpływu: czynniki rakotwórcze, układ oddechowy – związki nieorganiczne, zakwaszenie/eutrofizacja są ujemne, co oznacza pozytywny wpływ na środowisko („uniknięte wpływy”). Można to wyjaśnić recyklingiem surowców wtórnych oraz produkcją energii elektrycznej i ciepłej

z ujmowanego gazu składowiskowego. Wartości pozostałych kategorii wpływu: zmiana klimatu, układ oddechowy, ekotoksyczność są dodatnie, co oznacza niekorzystny wpływ na środowisko.

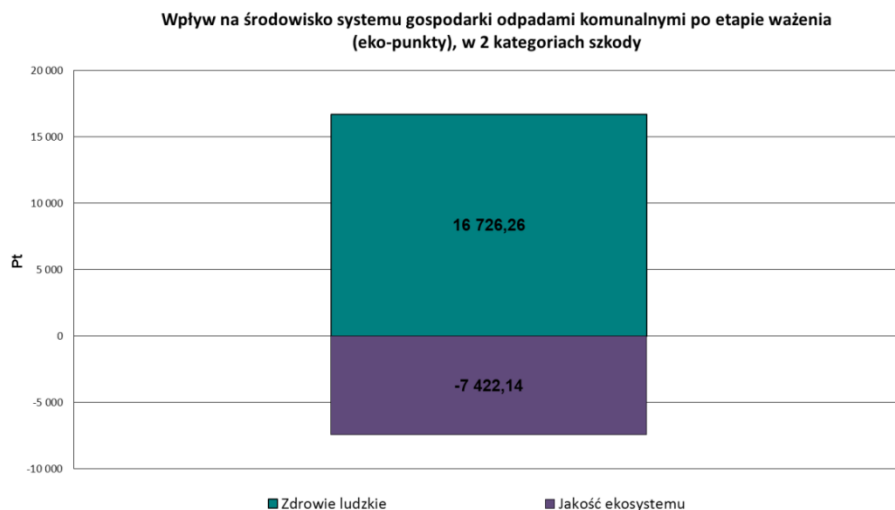


**Rys. 3. Wpływ na środowisko emisji do wody**

Fig. 3. Environmental impact of emissions to water

Jedynie dla dwóch kategorii wpływu dla emisji do wód tj. czynników rakotwórczych oraz ekotoksyczności wartości są różne od zera, obydwie ujemne. Wartości zerowe dla kategorii: układ oddechowy – związki nieorganiczne, układ oddechowy – związki organiczne oraz zmiana klimatu mogą być wyjaśnione tym, że emisje do wody zasadniczo nie wpływają na zaburzenia oddechowe u ludzi ani zmiany klimatyczne. Natomiast trudno znaleźć sensowne uzasadnienie dla wartości zerowej zakwaszenia/eutrofizacji, biorąc pod uwagę znaczne wartości parametrów zanieczyszczających w odciekach ze składowisk odpadów komunalnych. W tym kontekście również trudno tłumaczyć ujemne wartości kategorii: czynniki rakotwórcze i ekotoksyczność (korzystny wpływ na środowisko). Z zamieszczonych na rys 3. wyników analizy cyklu życia wynika że, wpływ na środowisko, emisji do wody, pochodzących z systemu gospodarki odpadami komunalnymi jest pozytywny, co należy uznać za niedorzeczne.

Końcowy wynik przeprowadzonej analizy cyklu życia systemu gospodarki odpadami komunalnymi jest wyrażony w ekopunktach (Pt) w dwóch kategoriach szkody: zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu. Wynik końcowy ewaluacji przedstawiono na rys. 4.



**Rys. 4. Wpływ na środowisko systemu gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie, w dwóch kategoriach szkody**

Fig. 4. Environmental impact of the municipal waste management system in Krakow, in two damage categories

## 5. Wnioski - ocena modelu IWM-PL

Na podstawie powyższych rozważań oraz przedstawionych wyników analizy cyklu życia systemu gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie, dokonano oceny modelu IWM-PL:

1. Jednostką funkcjonalną w modelu IWM-PL jest całkowita ilość odpadów wprowadzonych do systemu, podobnie jak w innych modelach np. IWM-2, EASEWASTE. Dzięki tak zdefiniowanej jednostce funkcjonalnej możliwe jest porównywanie różnych scenariuszy gospodarki odpadami, dla jednego regionu lub miasta, natomiast niemożliwe jest porównywanie rozwiązań stosowanych w różnych miastach/regionach.
2. Wiarygodność i rzetelność wyników przeprowadzonej analizy cyklu życia zależą niewątpliwie, od jakości wprowadzonych danych, ale także od konstrukcji samego modelu: danych domyślnych, baz danych wbudowanych w model, zastosowanej metodyki obliczania emisji, zastosowanej metodyki oceny wpływu cyklu życia. Wprowadzane dane cechuje określona niepewność. Dane odznaczające się niską niepewnością dotyczą bilansu wytwarzanych i zbieranych odpadów oraz ich składu morfologicznego (dokładne badania dla Krakowa prowadzona stosunkowo niedawno). Natomiast większą niepewnością są obciążone dane dotyczące procesów przetwarzania odpadów, transportu, bilansu paliwowo-energetycznego instalacji. Na przykład wartość domyślna modelu dotycząca wytwarzania gazu składowiskowego

- z odpadów nieprzetworzonych wynosi  $250 \text{ m}^3$  na jedną tonę, podczas gdy te wartości według różnych autorów mieszczą się w zakresie od 180 - 240  $\text{m}^3/\text{Mg}$  odpadów [3], 120 – 180  $\text{m}^3/\text{Mg}$  [11], 150 – 170  $\text{m}^3/\text{Mg}$  [13].
3. Struktura wprowadzania danych do modelu o ilości i składzie morfologicznych zebranych odpadów zmieszanych jest przejrzysta. Wymagane dane: rodzaje i liczba frakcji odpadów, są zbieżne z ogólnie przyjętą w Polsce metodyką określania składu morfologicznego. Uciążliwe jest wprowadzanie ilości selektywnie zebranych odpadów w kg oraz podział na tworzywa twarde i miękkie, a metali na żelazne i nieżelazne. Należy także pamiętać, że w modelu odpady zebrane w dzwonach nie są kierowane do sortowania, a bezpośrednio do recyklingu. Szczególnie kłopotliwe jest wprowadzanie danych dotyczących odpadów wielkogabarytowych. W modelu nie można podać ogólnej ilości zebranych odpadów wielkogabarytowych, a jedynie ilości poszczególnych frakcji w kg, bez uwzględnienia drewna.
  4. Wprowadzanie danych w zakresie procesów przetwarzania odpadów, budzi poważne zastrzeżenia i wątpliwości. Dane do procesu sortowania odpadów wielkogabarytowych wymagają wcześniejszych niełatwych obliczeń i założeń. W modelu IWM-PL proces produkcji paliwa alternatywnego RDF jest tylko możliwy ze zmieszanych odpadów komunalnych, ale nie jest możliwy z odpadów balastowych po sortowaniu selektywnie zebranych odpadów, czy odpadów wielkogabarytowych. Model nie jest na tyle elastyczny, aby umożliwić wprowadzanie różnych wariantów procesów. Wymagane parametry w procesie składowania, dotyczące gazu i odcieków, są sformułowane bardzo niejednoznacznie, a to przede wszystkim od wartości tych parametrów zależy końcowy wynik analizy cyklu życia systemu gospodarki odpadami komunalnymi.
  5. Wartości parametrów emisji do wody, obliczone w modelu IWM-PL są mocno zadziwiające. Wartości ujemne emisji z procesu składowania dla: siarczanów, chlorków, żelaza, aluminium i innych substancji, uzyskane w modelu, oznaczają korzystny wpływ na środowisko tj. odcieki ze składowiska odpadów przyczyniają się do poprawy jakości wód powierzchniowych i podziemnych. Jest to w ewidentnej sprzeczności z rzeczywistością, bowiem proces deponowania odpadów komunalnych na składowiskach, generuje odcieki o ogromnym ładunku substancji zanieczyszczających, a zwłaszcza wysokich wartościach wymienionych parametrów. W tym kontekście model IWM-PL może służyć raczej do analiz porównawczych scenariuszy gospodarki odpadami np. scenariusz oparty o składowanie lub o spalanie odpadów, a nie do dokumentowania wpływu na środowisko przyjętego systemu gospodarki odpadami.
  6. Do oceny wpływu cyklu życia (LCIA) opracowano wiele dobrze udokumentowanych metodyk [4], natomiast w modelu IWM-PI nie zastosowano żadnej z istniejących metodyk. Metodyka w modelu IWM-PI jest oparta o Ekoindykator 99, ale jedynie w ograniczonym zakresie. W ogóle nie uwzględ-

niono kategorii szkody: zasoby naturalne. Natomiast dwie pozostałe kategorie szkody są okrojone: w kategorii szkody zdrowie ludzkie nie uwzględniono promieniowania i zubożenia warstwy ozonowej, a w kategorii szkody jakość ekosystemu nie uwzględniono użytkowania terenu. Spośród 11 kategorii wpływów stosowanych w metodyce Eko-indyktor 99, w modelu IWM-PL występuje jedynie 6.

7. Końcowy wynik analizy cyklu życia systemu gospodarki odpadami w Krakowie, wyrażony w ekopunktach (Pt), wskazuje pozytywny wpływ na środowisko w kategorii szkody: jakość ekosystemu (ujemna wartość). Trudno uznać za wiarygodny taki wynik, który informuje o tym, że system gospodarki odpadami komunalnymi w dużej aglomeracji miejskiej, powoduje poprawę jakości ekosystemów.

Pracę zrealizowano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.008

## Literatura

- [1] Dalman J., Muszyński K., Polek A. Sprawozdanie z realizacji „Planu Gospodarki Odpadami dla Miasta Krakowa – plan na lata 2008 – 2011 oraz perspektywa na lata 2012 – 2015” za okres sprawozdawczy: od 01.01.2009 do 31.12.2010 r. Urząd Miasta Krakowa, Kraków, czerwiec 2011.
- [2] Dreyer L.C., Niemann A.L., Hauschild M.Z., Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99: Does it matter which one you choose? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2003, 8 (4) 191-200.
- [3] Ehrig, H.-J. Untersuchungen zur Gasbildung aus Hausmüll MuA Lfg. 5/1986 in Müll Handbuch, Band 4; Erich Schmidt Verlag; Berlin 1986.
- [4] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. First edition 2010.
- [5] Fudala – Książek S.: Wpływ zrzutu odcieków składowiskowych na efektywność pracy miejskiej oczyszczalni ścieków. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2011.
- [6] Gentil EC, Damgaard A, Hauschild M, Finnveden G, Eriksson O, Thorneloe S, Kaplan PO, Barlaz M, Muller O, Matsui Y, Ii R, Christensen TH. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. *Waste Management* 2010, 30 (12), 2636-48.
- [7] Heyer, K.U., Stegmann, R. Leachate management: leachate generation, collection, treatment and costs; 2001. Dostępne na stronie: <http://www.ifas-hamburg.de/pdf/leachate.pdf>.
- [8] Kraszewski A., Pietrzyk-Sokulska E. [red.], Ocena systemu gospodarki odpadami. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2011.

- [9] PN-EN ISO 14040 :2009 Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- [10] Sieja L., i in., Badanie ilości i struktury odpadów komunalnych Miasta Krakowa. Raport końcowy, IETU, Katowice, listopad 2011.
- [11] Stegmann, R. Ergebnisse von Abbauversuchen im Laborversuch, Gas und Wasserhaushalt von Muldeponien, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, Heft 33. 1982.
- [12] Szpadt R. Usuwanie i oczyszczanie odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Przegląd komunalny, 2006 .vol. 12(183), 60-66.
- [13] Tabasaran, O. and Rettenberger, R. Möglichkeiten zur Ermittlung des Gaspotenzials, in BMFT, Umweltbundesamt: Deponiegasnutzung 1984.

## EVALUATION OF IWM-PL MODEL – A POLISH APPLICATION FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WASTE MANAGEMENT SYSTEMS

### Summary

Life Cycle Assessment (LCA) is a technique for evaluating environmental aspects and potential environmental impacts, also employed for evaluating waste management systems. So far several waste LCA tools have been developed to model the environmental impact of waste management systems. In 2011 a first Polish language application, the IWM-PI model, was issued. In this paper the IWM-PL model was evaluated, on the example of LCA study for the municipal waste management system in Krakow. The structure of data needed to be introduced into model, that is life cycle inventory (LCI), was presented, as well as results of life cycle impact assessment (LCIA). The system boundaries of this analysis were defined as all processes of waste treatment performed in Krakow, (recycling of secondary materials outside Krakow), transport of collected waste to the waste facilities (sorting station, dismantling station, composting plants, landfill) and also transport of secondary raw materials from the sorting station to the recycling stations. The constructing of waste facilities were excluded from system boundaries, while the fuel and energy needed for operating the installations were incorporated in the system boundaries. The methodology of the life cycle impact assessment (LCIA) in model IWM-PL is based on the Eco-indicator 99. In this paper the impact categories used in Eco-indicator 99 were shown, gathered into three damage categories: human health, ecosystem quality and resources. The impact categories used in Eco-indicator 99 were compared to those employed in the IWM-PL model. Applying the IWM-PL model emissions to air and water were calculated and then converted into six impact categories. Final result of the total environmental impact of the municipal waste management system was expressed in eco-points (Pt) in two damage categories: human health and ecosystem quality.

**Keywords:** life cycle assessment (LCA), environmental impact, municipal waste management

DOI: 10.7862/rb.2013.41

*Przesłano do redakcji w lipcu 2013 r.  
Przyjęto do druku we wrześniu 2013 r.*