

KRYSTYNA CZAPLICKA-KOLARZ, DOROTA BURCHART-KOROL^{*)}, JERZY KOROL

Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

Zastosowanie analizy cyklu życia i egzergii do oceny środowiskowej wybranych polimerów

Streszczenie – Technikę oceny cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*) oraz analizę egzergetyczną wykorzystano do oceny środowiskowej polimerów: PE, PP, PVC, PS i PET. W przeprowadzonej analizie uwzględniono szkody dla zdrowia człowieka, jakości ekosystemu oraz zużycie zasobów, wyznaczono wskaźnik emisji globalnego ocieplenia oraz skumulowane zużycie energii. W wyniku analizy egzergetycznej określono wskaźnik zrównoważonego rozwoju oraz koszt termoeologiczny wybranych polimerów. Porównano wyniki uzyskane za pomocą techniki LCA oraz analizy egzergetycznej, szacując wpływ produkcji wytypowanych polimerów na zużycie zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych. Ocenę cyklu życia LCA przeprowadzono trzema metodami: Ekowskażnik 99, IPCC oraz CED.

Słowa kluczowe: ocena cyklu życia, analiza egzergetyczna, zużycie paliw kopalnych, polimery.

APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT AND EXERGY TO ENVIRONMENTAL EVALUATION OF SELECTED POLYMERS

Summary – This paper presents LCA (*Life Cycle Assessment*) and exergy analysis for the environmental evaluation of selected polymers: PE, PP, PVC, PS and PET. In the analysis, damages to human health and ecosystem quality as well as resource consumption were considered, also global warming potential and cumulative energy use were determined. As a result of exergy analysis the sustainable development index and thermo-ecological cost of selected polymers were evaluated. The results from LCA study were compared with those obtained using exergy analysis and the impact of the production of selected polymers on the consumption of non-renewable natural resources was assessed. A life cycle assessment was conducted using three methods: Ecoindicator 99, IPCC and CED.

Keywords: Life Cycle Assessment, exergy analysis, fossil fuels consumption, polymers.

WPROWADZENIE

Obszar zastosowań tworzyw polimerowych na świecie stale się powiększa. Dzięki swoim unikatowym właściwościom tworzywa zastępują materiały, takie jak: metal, drewno, papier, ceramika i szkło. Ciągłe prowadzone prace badawcze nad opracowywaniem nowych materiałów polimerowych o specjalnych właściwościach, skutkują tym, że w wielu zastosowaniach tworzywa polimerowe całkowicie wypierają inne materiały. W wielu gałęziach przemysłu, szczególnie takich, w których wykorzystuje się zaawansowane technologie (kosmonautyka, medycyna, informatyka, technologie informacyjne), szybki rozwój jest możliwy dzięki użyciu nowych materiałów polimerowych. Znajdują one zastosowanie w innowacyjnych rozwiązaniach technologicznych i nowoczesnym wzornictwie, stając się integralną częścią otaczającej nas rzeczywistości.

Do „wielkiej piątki” tworzyw o największych udziałach na rynku zalicza się: polietylen (PE), polipropylen

(PP), poli(chlorek winylu) (PVC), polistyren (PS) oraz poli(tereftalan etylenu) (PET) [1]. Łączny popyt na wymienione polimery obejmuje ok. 74 % całego zapotrzebowania na tworzywa polimerowe w Europie. Ze względu na ich udział i znaczenie na rynku europejskim, przeprowadzono badania środowiskowe opierające się na technice oceny cyklu życia (LCA z ang. *Life Cycle Assessment*) oraz na podstawie analizy egzergetycznej obliczono wskaźnik zrównoważonego rozwoju.

PODSTAWY LCA ORAZ ANALIZY EGZERGETYCZNEJ

LCA jest techniką służącą do oceny potencjalnego wpływu na środowisko, w zakresie związanym ze wszystkimi etapami życia produktów oraz procesów obejmujących: wydobywanie i przetwarzanie surowców, technologie produkcji, dystrybucję, transport, użytkowanie, recykling oraz ostateczne unieszkodliwianie odpadów. Na świecie obserwuje się coraz większe zainteresowanie wykorzystaniem techniki LCA do oceny środowiskowej tworzyw polimerowych [2–5]; dobrym przykładem jest koncern BASF, który od lat już promuje i przeprowadza

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: dburchart@gig.eu

analizy środowiskowe przy użyciu oceny cyklu życia [6–8]. Na podstawie analiz LCA można ocenić nie tylko oddziaływanie produktów na poszczególne kategorie wpływu, takie jak: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu, zużycie zasobów, ale można również wskazać surowce lub też procesy produkcyjne generujące największe obciążenie środowiska. Klasyczna analiza LCA ma jednak pewne ograniczenia, jak np. stosowanie rozmaitych miar zużycia substancji bądź energii, co uniemożliwia sumowanie i porównywanie ze sobą różnego rodzaju szkodliwego oddziaływania. Wspólnym miernikiem jakości poszczególnych surowców, materiałów i paliw w całym cyklu życia jest egzergia, która może służyć jako narzędzie do oceny zużycia zasobów nieodnawialnych. Zarządzanie zasobami nieodnawialnymi stanowi jedną z kluczowych kwestii zrównoważonego rozwoju, w związku z tym coraz większą wagę przywiązuje się do metod służących do oceny efektywności wykorzystania materiałów i paliw w procesach przemysłowych. Analiza egzergetyczna rozwinęła się w wyniku zastosowania drugiej zasady termodynamiki do badania efektywności przemysłowych procesów cieplnych. Nazwę „egzergia” wprowadził Z. Rant w 1956 roku [9]. Egzergia wyraża maksymalną zdolność rozpatrywanej porcji energii do wykonania pracy z wykorzystaniem ciepła pobranego z otoczenia oraz powszechnie występujących i wzajemnie niezależnych składników otoczenia. Egzergia w przeciwieństwie do energii nie podlega prawu zachowania. Każda nieodwracalność powoduje bezzwrotną stratę egzergii. Stratę tę określa prawo Gouya-Stodoli [9, 10]. Oprócz podstawowych zastosowań związanych z projektowaniem i analizą systemów cieplnych oraz badaniem doskonałości procesów cieplnych, analiza egzergetyczna może służyć do oceny jakości nośników energii. Wspomaga również gospodarowanie zasobami nieodnawialnymi zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, zakładającymi ograniczenie zużycia nieodnawialnych bogactw naturalnych [11–16]. Kluczowym etapem rozwoju analizy egzergetycznej było opracowanie przez Szarguta teorii stanów odniesienia egzergii chemicznej. Umożliwiło to wyznaczenie egzergii chemicznej pierwiastków, będącej podstawą obliczania egzergii chemicznej substancji nieenergetycznych, było także punktem wyjścia dla zastosowania analizy egzergetycznej do oceny skutków ekologicznych (oceny wyczerpywania się surowców naturalnych) [14]. Szargut opracował analizę skumulowanego zużycia egzergii CE_xC (*Cumulative Exergy Consumption*), które jest sumą egzergii wszystkich zasobów naturalnych wykorzystywanych na wszystkich etapach procesu produkcyjnego. CE_xC uwzględnia energetyczne i nieenergetyczne zasoby naturalne [17]. Do metod integrujących analizę cyklu życia i egzergii i służących ocenie środowiskowej zalicza się:

– TEC (*Thermo-Ecological Cost*) koszt termoeologiczny – metoda określająca skumulowane zużycie egzergii nieodnawialnych surowców naturalnych, obciążające wszystkie etapy procesów wytwórczych od pozyskania

surowców do produktu końcowego [14, 18]. Na każdym z rozpatrywanych etapów łańcucha procesów produkcyjnych należy uwzględnić zużycie energii i materiałów, nakłady związane z transportem, powstawanie produktów ubocznych oraz straty związane z odprowadzaniem zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Koszt termoeologiczny wyraża się w jednostkach egzergii, a nie jednostkach monetarnych [14].

– CE_xD (*Cumulative Exergy Demand*) skumulowane zapotrzebowanie na egzergię – technika wyznaczająca sumę egzergii wszystkich zasobów (energetycznych i nieenergetycznych), wymaganych do prowadzenia procesu lub wytworzenia produktu. Wskaźnik CE_xD jest wyrażony w MJ [19].

– ELCA (*Exergetic Life Cycle Assessment*) [20, 21] lub LCEA (*Life Cycle Exergy Analysis*) [12, 15] – egzergetyczna ocena cyklu życia metodą określającą zużycie i wyczerpywanie się zasobów naturalnych z uwzględnieniem nieodwracalności cyklu życia.

– CE_xA (*Cumulative Exergy Consumption for Abatement*) [22, 23] – technika oceniająca skumulowane zużycie egzergii w celu zmniejszenia emisji.

– ECExC (*Equivalent Cumulative Exergy Consumption*) ekwiwalent skumulowanego zużycia egzergii – metoda wyznaczająca wskaźnik skumulowanego zużycia egzergii dla ograniczenia emisji CE_xCT (*Cumulative Exergy Consumption for Treatment of Emissions*) w połączeniu z CE_xC [24, 25].

– CEENE (*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*) – skumulowane pozyskiwanie egzergii ze środowiska jako metoda LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) opierająca się na analizie egzergetycznej. Zaletą w porównaniu z innymi metodami oceny wpływu w konwencjonalnej analizie LCA jest brak wskaźników ważenia. Analiza egzergetyczna w CEENE jest częścią trzeciego etapu LCA [22].

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały i metodyka badań

Dokonano oceny środowiskowej, opartej na technice LCA oraz na wskaźniku zrównoważonego rozwoju, z zastosowaniem analizy egzergetycznej, w odniesieniu do procesu produkcji polimerów: PE, PP, PVC, PS oraz PET. Analizę cyklu życia LCA przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 14040:2009, w czterech etapach obejmujących: określenie celu i zakresu, analizę danych wejściowych i wyjściowych LCI (*Life Cycle Inventory*), wybór kategorii i metod oceny wpływu na środowisko LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) i interpretację wyników. Analizę cyklu życia wytypowanych tworzyw przeprowadzono wykorzystując program SimaPro 7.3.3 (Pre Consultants BV). W celu umożliwienia porównania wyników, wszystkie dane określono w odniesieniu do takiej samej jednostki funkcjonalnej, tj. na kg analizowanego tworzywa. Granice systemu zdefiniowano od wydobywania

surowców do uzyskania polimeru, uwzględniając zużycie wszystkich surowców i energii, emisje zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, ścieki oraz odpady. Wykorzystane do analizy LCA dane pochodzą z aktualizowanej na bieżąco bazy danych „ecoinvent” w programie SimaPro. Oddziaływanie na środowisko określono za pomocą trzech metod oceny wpływu: — Ekowskaźnik 99 [Eco-indicator 99 (E) V2.08/Europe EI 99 E/A], IPCC (IPCC 2007 GWP 100a V1.02 — Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential, 100 years) oraz CED (Cumulative Energy Demand V1.08). Metoda Eko-wskaźnik 99 służy do kompleksowej oceny trzech rodzajów negatywnych oddziaływań na środowisko w ujęciu: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu oraz zużycie zasobów. Metoda ta umożliwia również przedstawienie wpływu w 11 kategoriach, takich jak: rakotwórczość, układ oddechowy—substancje organiczne, układ oddechowy—substancje nieorganiczne, zmiany klimatu, promieniotwórczość, warstwa ozonowa, ekotoksyczność, zakwaszenie/eutrofizacja, wykorzystanie terenu, minerały oraz paliwa kopalne. Kategoria wpływu „zużycie paliw kopalnych” jest wyrażana przez nadwyżkę energii (surplus) na wydobycie MJ, kg lub m³ paliw kopalnych w przyszłości, wynikającą z niższej jakości zasobów. Wynik analizy metodą Ekowskaźnik 99 wyraża się w „punktach” (Pt). Jeden punkt reprezentuje tysięczną część rocznych obciążeń środowiska, powodowanych przez jednego mieszkańca Europy [26]. Opracowana przez Międzynarodowy Zespół do spraw Zmian Klimatu (IPCC) metoda IPCC (*carbon footprint*) służy do przedstawienia wpływu (wyrażonego, jako ekwiwalent CO₂) produktów na emisję gazów cieplarnianych. Metoda IPCC umożliwia ilościową ocenę wpływu poszczególnych gazów cieplarnianych (GHG — *greenhouse gases*) na efekt cieplarniany, w odniesieniu do CO₂, w przyjętym horyzoncie czasowym 100 lat. Wskaźnik oceny wpływu na efekt cieplarniany odniesiony do ditlenku węgla wynosi 1 (GHG =1) [27]. Metoda CED umożliwia określenie skumulowanego zapotrzebowania na energię, przy czym wskaźniki są podzielone na 7 kategorii wpływu: dwie nieodnawialne (paliwa kopalne oraz energetyka jądrowa) oraz pięć odnawialnych (biomasa, energia wiatrowa, słoneczna, geotermia oraz energia wodna) [28].

Analizę egzergetyczną przeprowadzono na podstawie danych literaturowych. W przypadku każdego tworzywa obliczano wskaźnik zrównoważonego rozwoju wyrażony stosunkiem kosztu termoeologicznego danego tworzywa do jego egzergii właściwej (1) [14, 29]. Analiza egzergetyczna, podobnie jak ocena cyklu życia, odnosi się do produkcji 1 kg wybranych polimerów.

$$r_j = \frac{\rho_j}{b_j} \quad (1)$$

gdzie: r_j — wskaźnik zrównoważonego rozwoju, b_j — egzergia właściwa, ρ_j — koszt termoeologiczny j -tego produktu.

Im większa od jedności jest wartość wskaźnika r_j , tym bardziej niekorzystne jest oddziaływanie rozpatrywanej technologii lub produktu na wyczerpywanie nieodna-

wialnych bogactw naturalnych [14]. Jedynym kryterium oceny w analizach jest nieodwracalność procesu wyrażona stratą egzergii. Zużycie egzergii może służyć jako wskaźnik wyczerpywania zasobów. Przepływy materiałów i energii wyraża się w takiej samej jednostce energii, co umożliwia porównywanie wpływu wszystkich zasobów [11].

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Wyniki analizy LCA w odniesieniu do produkcji wybranych do badań polimerów, metodą Ekowskaźnik 99 we wszystkich kategoriach wpływu, przedstawia tabela 1.

Stwierdzono, że polipropylen wykazuje najwyższy wskaźnik środowiskowy równy 0,58 Pt/kg, a jego produkcję charakteryzuje również najwyższy wskaźnik szkód dla zdrowia ludzkiego. Największy wpływ na wskaźnik środowiskowy mają w tym przypadku przede wszystkim substancje nieorganiczne emitowane w toku produkcji polipropylenu.

Przeprowadzona analiza wykazała, że spośród 11 kategorii wpływu kategoria „zużycie paliw kopalnych” ma najwyższy wskaźnik, w odniesieniu do wszystkich analizowanych polimerów i stanowi: 68,4 % w przypadku PE, 65,5 % — PS, 62,0 % — PET, 49,1 % — PVC oraz 42,6 % — PP.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki oceny zużycia paliw kopalnych w toku produkcji polimerów w Polsce, dokonanej z zastosowaniem dwóch metod — Ekowskaźnik 99 i CED. W tabeli 3 natomiast zebrano wyniki oceny emisji gazów cieplarnianych w odniesieniu do produkcji polimerów w Polsce, przeprowadzonej metodą IPCC. Wielkość produkcji PE, PP, PS i PVC określono na podstawie danych GUS za rok 2011 [30], wielkość produkcji PET jest prognozowana na rok 2013 [31].

Największe zużycie paliw kopalnych występuje w procesie produkcji PET i wynosi 8,35 MJ surplus/kg tworzywa, najmniejsze natomiast w procesie produkcji PVC — 4,82 MJ surplus/kg tworzywa. Uwzględniając wielkość produkcji wytypowanych polimerów w Polsce stwierdzono, że wskaźnik zużycia paliw kopalnych w odniesieniu do wszystkich analizowanych tworzyw wynosi 9 168 166 GJ surplus/r., co stanowi ilość energii potrzebnej na wydobycie paliw kopalnych w przyszłości, wynikającą z ich niższej jakości. Ocenione metodą CED największe zużycie paliw nieodnawialnych w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej wynosi 106,73 MJ/kg tworzywa i również dotyczy produkcji PET, mniejsze natomiast dotyczy produkcji PVC i jest równe 62,78 MJ/kg tworzywa. Uwzględniając wielkość produkcji wytypowanych polimerów stwierdzono, że wskaźnik zużycia paliw nieodnawialnych wszystkich analizowanych tworzyw wynosi 123 144 TJ/r., co jest równoważne z wielkością skumulowanego zapotrzebowania na energię z paliw nieodnawialnych do rocznej produkcji wytypowanych polimerów w Polsce. Największą emisję gazów cieplar-

Tabela 1. Ocena środowiskowa polimerów metodą Ekowskażnik 99 (Pt/kg)**Tabelle 1. Environmental assessment of polymers based on Ecoindicator 99 (Pt/kg)**

Kategoria szkód	Kategoria wpływu	PVC	PS	PP	PET	PE
Zdrowie ludzkie	rakotwórczość	0,02052	0,00272	0,00704	0,02496	0,00061
	układ oddechowy – substancje organiczne	0,00052	0,00030	0,00301	0,00376	0,00122
	układ oddechowy – substancje nieorganiczne	0,09193	0,08560	0,25839	0,10297	0,06516
	zmiany klimatu	0,02853	0,02503	0,03167	0,03538	0,00895
	promieniotwórczość	0,00250	0	0,00112	0,00107	0
	warstwa ozonowa	0,01948	0	0,00041	0,00050	0
	razem – zdrowie ludzkie	0,16348	0,11365	0,30163	0,16864	0,07594
Ekosystem	ekotoksyczność	0,00526	0,00119	0,00909	0,00635	0,00003
	zakwaszenie/eutrofizacja	0,00408	0,00559	0,01934	0,00504	0,00443
	wykorzystanie terenu	0,00516	0,00235	0,00259	0,00257	0,00169
	razem – ekosystem	0,01449	0,00913	0,03102	0,01396	0,00615
Zasoby naturalne	minerały	0,00061	0,00002	0,00035	0,00036	0,00000
	paliwa kopalne	0,17249	0,23315	0,24746	0,29844	0,17805
	razem – zasoby	0,17310	0,23300	0,24781	0,29880	0,17800
Razem		0,35107	0,35595	0,58047	0,48140	0,26014

Źródło: Obliczenia własne z zastosowaniem programu SimaPro 7.3.3.

Tabela 2. Ocena zużycia zasobów kopalnych w odniesieniu do produkcji polimerów w Polsce**Tabelle 2. Evaluation of fossil fuels consumption with reference to the production of polymers in Poland**

Rodzaj polimeru	Wielkość produkcji Mg/r.	Ekowskażnik 99		CED	
		MJ surplus/kg	GJ surplus/r.	MJ/kg	GJ/r.
PE	364 390	4,98	1 814 320	75,74	27 597 989
PP	248 904	6,92	1 722 438	88,64	22 062 795
PS	129 561	6,52	844 710	91,55	11 861 918
PVC	369 505	4,82	1 782 279	62,78	23 199 210
PET	360 000	8,35	3 004 417	106,73	38 422 260
Razem	1 472 361	—	9 168 166	—	123 144 000

Źródło: Obliczenia własne z zastosowaniem programu SimaPro 7.3.3.

Tabela 3. Ocena metodą IPCC emisji gazów cieplarnianych w toku produkcji polimerów w Polsce**Tabelle 3. Assessment of greenhouse gas emission during the production of polymers in Poland by IPCC method**

Rodzaj polimeru	Wielkość produkcji Mg/r.	Emisja gazów cieplarnianych	
		kg CO _{2 eq} /kg	Mg CO _{2 eq} /r.
PE	364 390	0,94	343 000
PP	248 904	3,40	846 000
PS	129 561	2,68	347 000
PVC	369 505	3,94	1 450 000
PET	360 000	3,77	1 360 000
Razem	1 472 361	—	4 350 000

Źródło: Obliczenia własne z zastosowaniem programu SimaPro 7.3.3.

nianych odnotowano w toku produkcji PVC – 3,94 kg CO_{2 eq}/kg, najmniejszą natomiast, wynoszącą

0,94 kg CO_{2 eq}/kg w toku produkcji polietylenu. Emisja gazów cieplarnianych, uwzględniająca założoną roczną produkcję analizowanych polimerów w Polsce, wynosi 4 350 000 Mg CO_{2 eq}/r. Emisja GHG w procesie produkcji PET i PVC stanowi ponad 64 % emitowanych w toku produkcji gazów cieplarnianych wszystkich analizowanych polimerów.

Kolejnym etapem prac była analiza egzergetyczna. Na podstawie wartości egzergii właściwej poszczególnych polimerów oraz kosztu termoeologicznego wyznaczono wskaźnik zrównoważonego rozwoju [obliczany wg (1)]. Wskaźnik TEC wyznaczono natomiast opierając się na danych literaturowych [9, 14].

Wyniki przedstawione w tabeli 4 wskazują, że najmniejszym wskaźnikiem zrównoważonego rozwoju charakteryzuje się PE, największym natomiast PET. Oznacza to, że proces produkcji poli(tereftalanu etylenu) najbardziej niekorzystnie wpływa na wyczerpywanie nieodnawialnych bogactw naturalnych. Określony metodą ana-

lize LCA wskaźnik zużycia paliw kopalnych, w przypadku PET także jest największy.

T a b e l a 4. Wskaźnik zrównoważonego rozwoju i kosztu termoeologicznego wybranych polimerów

T a b l e 4. The sustainable development index and thermoecological cost of selected polymers

Wskaźnik	PE	PET	PP	PS	PVC
b_j , MJ/kg	46,5	23,8	46,4	42,0	19,7
ρ_j , MJ/kg	86,0	86,8	85,20	91,9	67,0
r_j	1,85	3,65	1,84	2,19	3,40

Źródło: obliczenia własne na podstawie [14].

WNIOSKI

Wskaźniki kosztu termoeologicznego, jak również zrównoważonego rozwoju, określone za pomocą analizy egzergetycznej mogą służyć do rozszerzenia konwencjonalnej oceny cyklu życia (metodą LCA), w celu oszacowania stopnia wyczerpywania zasobów naturalnych.

Metodą Ekowskaźnik 99 stwierdzono, że spośród analizowanych tworzyw polimerowych najwyższy wskaźnik środowiskowy wykazuje polipropylen, co wiąże się z wykorzystaniem w toku produkcji PP gazu ziemnego i emisją substancji nieorganicznych negatywnie wpływających na układ oddechowy.

Największe zużycie surowców nieodnawialnych, oznaczone metodą CED i potwierdzone analizą wykonaną metodą Ekowskaźnik 99, występuje w procesie produkcji PET, najmniejsze zaś w przypadku PVC.

Na duże zużycie surowców nieodnawialnych w przypadku produkcji PET ma wpływ przede wszystkim, wykorzystanie ropy naftowej. Przeprowadzone dla PET wyniki analizy LCA są zgodne z analizą egzergetyczną, zgodnie z którą PET wykazuje najwyższy wskaźnik zrównoważonego rozwoju.

Największa emisja gazów cieplarnianych występuje podczas produkcji PVC, co jest związane ze znacznym zużyciem energii elektrycznej.

Ze względu na istotny wpływ procesów produkcji polimerów na zużycie paliw kopalnych i globalne ocieplenie, należy większą uwagę poświęcić ich recyklingowi oraz produkcji tworzyw i kompozytów polimerowych, wykorzystujących surowce odnawialne.

LITERATURA

1. Raport „Tworzywa sztuczne – fakty 2011”, www.plastics-europe.pl (dostęp 05.06.2012).
2. Nishijima A., Nakatani J., Yamamoto K., Nakajima F.: *J. Mater. Cycles Waste. Manag.* 2012, **14**, 52.
3. Sujit D.: *Int. J. LCA* 2011, **16**, 268.
4. Humbert S., Rossi V., Margni M., Joliet O., Loerincik Y.: *Int. J. LCA* 2009, **14**, 95.

5. Dodbiba G., Takahashi K., Sadaki J., Fujita T.: *J. Clean. Prod.* 2008, **16**, 458.
6. Kicherer A., Schaltegger S., Tschochohei H., Pozo B.: *Int. J. LCA* 2007, **12**, 537.
7. Kölsch D., Saling P., Kicherer A., Grosse-Sommer A., Schmidt I.: *IJSD* 2008, **11**, 1.
8. www.plasticsportal.net (dostęp 05.06.2012).
9. Szargut J.: „Egzergia: Poradnik obliczania i stosowania”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
10. Szargut J.: *Brennstoff-Wärme-Kraft* 1967, **7–8**, 19.
11. Burchart-Korol D., Czaplicka-Kolarz K.: *Przegląd Górniczy* 2012, **3**, 32.
12. Gong M., Wall G.: *Int. J. Exergy* 2001, **1**, 217.
13. Rosen M. A., Dincer I.: *Int. J. Exergy* 2001, **1**, 457.
14. Stanek W.: „Metodyka oceny skutków ekologicznych w procesach cieplnych za pomocą analizy egzergetycznej”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
15. Wall G., Gong M.: *Int. J. Exergy* 2001, **1**, 128.
16. Wang Y., Feng X.: *Comput. Chem. Eng.* 2000, **24**, 1243.
17. Szargut J., Morris D. R.: *Int. J. Energ. Res.* 1987, **11**, 245.
18. Szargut J.: „Application of Exergy for the Calculation of Ecological Cost”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 1986, **7–8**.
19. Bösch M. E., Hellweg S., Huijbregts M. A. J., Frischknecht R.: *Int. J. LCA* 2007, **12**, 183.
20. Cornelissen R., Hirsh G.: *Energ. Convers. Manage.* 2002, **43**, 1417.
21. Cornelissen R.: „Thermodynamics and Sustainable Development – the use of Exergy Analysis and the Reduction of Irreversibility”. Doctoral thesis, University of Twente, The Netherlands 1997.
22. Dewulf J., Bosch M., Meester B., Vorst G., Langenhove H., Hellweg S., Huijbregts M.: *Environ. Sci. Technol* 2007, **41**, 8477.
23. Dewulf J., Langenhove H. V., Dirck J.: *Sci. Total. Environ.* 2001, **273**, 41.
24. Zhu P., Feng X., Liu Y. Z.: *Comput. Aided. Chem. Eng.* 2003, **15**, 1141.
25. Zhu P., Feng X., Shen R. J.: *Proc. Saf. Environ. Protect.* 2005, **83**, 257.
26. Goedkoop M., Spriensma R.: „The Eco-indicator 99 A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment”, Methodology Report PRé Consultants B.V. 2000.
27. IPCC (2007). IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. www.ipcc.ch (dostęp 05.06.2012).
28. Deutscher V.: „VDI-richtlinie 4600: Cumulative Energy Demand, Terms, Definitions, Methods of Calculation”, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997.
29. Berg van den M. M. D., Kooi van den H. J., Swaan Arons de J.: „A thermodynamic Basis for Sustainability”, w „Proceedings of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Aspects of Energy Systems”, ECOS '99, June 8–10, Tokyo, Japan 1999.
30. www.stat.gov.pl (dostęp 04.06.2012).
31. www.plastech.pl (dostęp 05.06.2012).

Otrzymano 20 VI 2012 r.