

Izabela PIASECKA, Andrzej TOMPOROWSKI

e-mail: piasecka-izabela@wp.pl

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Modele cyklu życia w ocenie destrukcyjności wirnika elektrowni wiatrowej. Cz. II. Wyniki badań

### Metodyka

Ocenie środowiskowej opartej na modelowaniu LCA poddano zespół roboczy wirnika elektrowni wiatrowej *Gamesa G90*. Ocenę przeprowadzono zgodnie z normami [PN-EN ISO 14040:1997; PN-EN ISO 14041:1998; PN-EN ISO 14042:2000; PN-EN ISO 14043:2000] wykorzystując program *SimaPro 7.1.8 (PRé Consultants)*.

Oddziaływanie zespołu roboczego wirnika elektrowni wiatrowej na środowisko zbadano przyjmując długość cyklu życia równą 20 lat i zastosowano trzy metody oceny wpływu:

1. *Ekowskażnik 99 (Eco-indicator 99 (E) V2.06/Europe EI 99 E/A)*,
2. *CED (Cumulative Energy Demand) V1.05*
3. *IPCC (IPCC 2007 GWP 100a V1.01, czyli Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential, 100 lat)*.

Do czterech podstawowych rodzajów destrukcyjności zespołów roboczych elektrowni wiatrowych przyporządkowano kategorie wpływów (oddziaływania środowiskowe). Dla ergonomię były to związki nieorganiczne i organiczne powodujące choroby układu oddechowego, związki promieniotwórcze i rakotwórcze. W stosunku do defunkcyjności stanowiły je związki powodujące zmiany klimatu oraz zubożenie warstwy ozonowej, procesy związane z użytkowaniem gruntów, wydobywaniem minerałów oraz paliw kopalnych. W odniesieniu do ekologiczności wybrano: użytkowanie gruntów, wydobywanie minerałów i paliw kopalnych, związki ekotoksyczne, związki powodujące zakwaszenie/eutrofizację, zmiany klimatu oraz zubożenie warstwy ozonowej, związki promieniotwórcze i rakotwórcze. Z kolei sozologiczność cha-

rakteryzowało użytkowanie gruntów, wydobywanie minerałów i paliw kopalnych oraz związki powodujące zmiany klimatu.

Celem pracy było dokonanie opisu, analizy i badania oceny destrukcyjnych oddziaływań podczas wytwarzania, eksploatacji i recyklingu zespołów roboczych elektrowni wiatrowych na przykładzie zespołu roboczego wirnika.

### Wyniki badań

Do obliczania maksymalnych szkód środowiskowych wykorzystano metodę *Ekowskażnika 99* [Goedkoop i Spriensma, 1995; Ragas, 1995; Hanssen i Asbjørnsen, 1996; Azapagic i Clift, 1999; Goedkoop i in., 2010; Piasecka, 2014].

Wyniki badań przedstawiono w tab. 1 wyrażone w podstawowych jednostkach, jak: [DALY], [PAF·m<sup>2</sup>·rok], [PDF·m<sup>2</sup>·rok], [MJ surplus energy] oraz w punktach [Pt]

Analizując destrukcyjność ergonomiczną, najlepsze rezultaty odnośnie obniżenia poziomu szkodliwego oddziaływania otrzymano dla związków nieorganicznych powodujących choroby układu oddechowego (-0,0326 DALY), a wśród nich w szczególności dla tlenu azotu (69,1%), tlenu siarki (19,6%) i cząsteczek < 10 μm (11,3%). Najlepsze efekty osiągnięto dla związków rakotwórczych (0,000879 DALY), spośród nich największy odsetek stanowiły niespecyfikowane jony metali (68,4%), jony arseniku (16,5%) i kadm (9,12%). Pod względem destrukcyjności defunkcyjnej, największe obniżenie poziomu negatywnego oddziaływania odnotowano dla związków powodujących zmiany klimatu (-0,00831 DALY), był to głównie dwutlenek

Tab. 1. Wyniki badań destrukcyjności występującej podczas cyklu życia zespołu roboczego wirnika elektrowni wiatrowej *Gamesa G90* z uwzględnieniem kategorii wpływów (poziom odcięcia: 0,001%) wyrażone w: <sup>a</sup>[DALY], <sup>b</sup>[PAF·m<sup>2</sup>·rok], <sup>c</sup>[PDF·m<sup>2</sup>·rok], <sup>d</sup>[MJ surplus energy] oraz w [Pt]

Rodzaje destrukcyjności	Kategorie wpływów (oddziaływania środowiskowe)	Cykl życia		Cykl życia [Pt]	
		bez recyklingu	z recyklingiem	bez recyklingu	z recyklingiem
Ergonomiczność	związki nieorganiczne powodujące choroby układu oddechowego	0,0863 <sup>a</sup>	-0,032600 <sup>a</sup>	2 247,31	2 247,31
	związki organiczne powodujące choroby układu oddechowego	- 0,0002 <sup>a</sup>	-0,000645 <sup>a</sup>	-4,477	-4,477
	związki promieniotwórcze	0,0006 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	14,92	14,92
	związki rakotwórcze	0,0062 <sup>a</sup>	0,000879 <sup>a</sup>	161,57	161,57
Defunkcyjność	związki powodujące zmiany klimatu	0,0204 <sup>a</sup>	-0,008310 <sup>a</sup>	532,37	532,37
	związki powodujące zubożenie warstwy ozonowej	0,0009 <sup>a</sup>	-0,000021 <sup>a</sup>	22,52	22,52
	użytkowanie gruntów	3 013,526 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	235,06	235,06
	wydobywanie minerałów	38 310,296 <sup>d</sup>	-0,002990 <sup>d</sup>	911,79	911,79
	wydobywanie paliw kopalnych	217 039,020 <sup>d</sup>	-0,000026 <sup>d</sup>	5 165,53	5 165,53
Ekologiczność	użytkowanie gruntów	3 013,526 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	235,06	235,06
	wydobywanie minerałów	38 310,296 <sup>d</sup>	-0,002990 <sup>d</sup>	911,79	911,79
	wydobywanie paliw kopalnych	217 039,020 <sup>d</sup>	-0,000026 <sup>d</sup>	5 165,53	5 165,53
	związki ekotoksyczne	29 570,686 <sup>b</sup>	0,008180 <sup>b</sup>	230,65	230,65
	związki powodujące zakwaszenie/eutrofizację	2 251,595 <sup>c</sup>	-0,001570 <sup>c</sup>	175,62	175,62
	związki powodujące zmiany klimatu	0,0204 <sup>a</sup>	-0,008310 <sup>a</sup>	532,37	532,37
	związki powodujące zubożenie warstwy ozonowej	0,0009 <sup>a</sup>	-0,000021 <sup>a</sup>	22,52	22,52
	związki promieniotwórcze	0,0006 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	14,92	14,92
	związki rakotwórcze	0,0062 <sup>a</sup>	0,000879 <sup>a</sup>	161,57	161,57
Sozologiczność	użytkowanie gruntów	3 013,526 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	235,06	235,06
	wydobywanie minerałów	38 310,296 <sup>d</sup>	-0,002990 <sup>d</sup>	911,79	911,79
	wydobywanie paliw kopalnych	217 039,020 <sup>d</sup>	-0,000026 <sup>d</sup>	5 165,53	5 165,53
	związki powodujące zmiany klimatu	0,0204 <sup>a</sup>	-0,008310 <sup>a</sup>	532,37	532,37

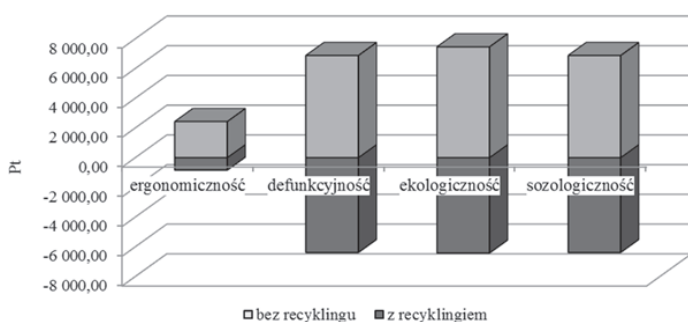
węgla (84,8%), tetrafluorometan (8,73%) i metan (5,72%). Pod kątem destrukcyjności ekologicznej, istotnie obniżył się poziom niekorzystnych oddziaływań wywołanych przez związki powodujące zmiany klimatu ( $-0,00831$  DALY), związki powodujące zakwaszenie/eutrofizację ( $-1,57 \cdot 10^3$  PDF $\cdot$ m<sup>2</sup>·rok) – w stosunku do nich głównie tlenek azotu (92,3%) i tlenek siarki (7,76%) oraz wydobycie paliw kopalnych ( $-2,56 \cdot 10^3$  MJ) – wśród których dominuje wydobycie ropy naftowej 42,7 MJ/kg (34%), gazu ziemnego 30,3 MJ/kg (28,1%), energia z ropy naftowej (27,8%) i gazu ziemnego (14,8%), a najmniej – przez związki ekotoksyczne ( $8,18 \cdot 10^3$  PAF $\cdot$ m<sup>2</sup>·rok) – spośród nich przede wszystkim nikiel (66,1%), cynk (17,4%) i ołów (16,5%) oraz związki rakotwórcze (0,00879 DALY). Na podstawie badań poziomu destrukcyjności sozologicznej stwierdzono, że dzięki recyklingowi najbardziej zmalało szkodliwe oddziaływanie związków powodujących zmiany klimatu ( $-0,00831$  DALY) (Tab. 1).

Badając destrukcyjność ergonomiczną metodą ważenia w trakcie cyklu życia zespołu roboczego wirtualnej elektrowni wiatrowej, najwyraźniejsze obniżenie poziomu destrukcyjnego oddziaływania uzyskano dla związków nieorganicznych powodujących choroby układu oddechowego (-850 Pt), a najniższe efekty osiągnięto dla związków rakotwórczych (22,9 Pt). Pod kątem destrukcyjności defunkcyjnej, największe obniżenie poziomu negatywnego oddziaływania występowało w stosunku do procesów związanych z wydobyciem paliw kopalnych (-6 100 Pt), a dla destrukcyjności ekologicznej, najistotniej obniżył się poziom niekorzystnych oddziaływań warunkowanych również przez procesy związane z wydobyciem paliw kopalnych (-6 100 Pt), ale także przez związki powodujące zmiany klimatu (-216 Pt) oraz związki powodujące zakwaszenie/eutrofizację (-123 Pt).

Analizując poziom destrukcyjności sozologicznej, w wyniku zastosowania recyklingu, jako formy zagospodarowania użytkowego, najbardziej zmalało negatywne oddziaływanie procesów związanych z wydobyciem paliw kopalnych (-6 100 Pt) oraz związków powodujących zmiany klimatu (-216 Pt) (Tab. 1).

Rozpatrując całościowe oddziaływanie procesów związanych z cyklem życia wirtualnej elektrowni wiatrowej *Gamesa G90* można zauważyć, że najwyższym poziomem minimalizacji destrukcyjnych oddziaływań podczas recyklingu, charakteryzuje się ekologiczność (-6 423,83 Pt) i defunkcyjność (-6 387,53 Pt), najniższym – ergonomiczność (-843,9 Pt).

Wysokie obniżenie wielkości niekorzystnych wpływów w stosunku do destrukcyjności ekologicznej, defunkcyjnej i sozologicznej oraz znaczące – w odniesieniu do destrukcyjności ergonomicznej, potwierdza zasadność zastosowania recyklingu jako formy zagospodarowania wirtualnej elektrowni wiatrowej (Rys. 1).



Rys. 1. Oddziaływanie cyklu życia oraz recyklingu zespołu roboczego wirtualnej elektrowni wiatrowej *Gamesa G90* dla rodzajów destrukcyjności

Zastosowanie metody CED umożliwiło wyznaczenie skumulowanego poziomu zapotrzebowania na energię [Antonsson i Carlsson, 1995; Bovea i Powell, 2006].

W tab. 2 przedstawiono wyniki oceny zużycia zasobów kopalnych w odniesieniu do produkcji wirtualnej elektrowni wiatrowej metodą *Ekowskaźnika 99* i CED w jednym cyklu życia. Najmniejsze zużycie paliw kopalnych występuje podczas cyklu życia siłowni wiatrowej, w którym jako formę zagospodarowania użytkowego wybrano procesy

recyklingu i wynosi 190.300 MJ surplus/cykl życia (4,694 MJ surplus/kg materiału/tworzywa). Natomiast najniższe zużycie paliw nieodnawialnych w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej, ocenione metodą CED, wynosi 204.000 MJ/cykl życia (5,031 MJ/kg materiału/tworzywa) i również odnosi się do cyklu życia uwzględniającego recykling, co potwierdza słuszność tego rozwiązania.

Tab. 2. Ocena zużycia zasobów kopalnych w odniesieniu do produkcji wybranych materiałów metalowych i tworzyw polimerowych zespołów roboczych elektrowni wiatrowej metodą *Ekowskaźnika 99* i CED w jednym cyklu życia

Cykl życia	<i>Ekowskaźnik 99</i>		CED	
	[MJ surplus / kg]	[MJ surplus / cykl życia]	[MJ surplus / kg]	[MJ surplus / cykl życia]
bez recyklingu	8,344	338 300	9,150	371 000
z recyklingiem	4,694	190 300	5,031	204 000

Badania metodą IPCC dały możliwość ilościowej oceny wpływu gazów na efekt cieplarniany (w odniesieniu do CO<sub>2</sub>) [Blanchard i Fabrycky, 1998; Davis i in., 2011; Goedkoop i in., 2010].

W tab. 3 zestawiono wyniki oceny emisji gazów cieplarnianych w jednym cyklu życia wirtualnej elektrowni wiatrowej metodą IPCC. Emisja gazów cieplarnianych, uwzględniająca produkcję oraz zagospodarowanie użytkowe materiałów i tworzyw przypadających na realizację jednego cyklu życia wirtualnej 2 MW siłowni wiatrowej, wynosi łącznie 144 000 kg CO<sub>2 eq</sub>/cykl życia bez recyklingu (3,552 kg CO<sub>2 eq</sub>/kg materiału/tworzywa), a z recyklingiem – 104 000 kg CO<sub>2 eq</sub>/cykl życia (2,565 kg CO<sub>2 eq</sub>/kg materiału/tworzywa), co również obrazuje zasadność stosowania metod recyklingu, jako formy zagospodarowania użytkowego wirtualnej elektrowni wiatrowej.

Tab. 3. Wyniki emisji gazów cieplarnianych w procesie wytwarzania wybranych materiałów metalowych i tworzyw polimerowych zespołów roboczych elektrowni wiatrowej metodą IPCC w jednym cyklu życia

Cykl życia	Emisja gazów cieplarnianych	
	kg CO <sub>2 eq</sub> /kg	kg CO <sub>2 eq</sub> /cykl życia
bez recyklingu	3,552	144 000
z recyklingiem	2,565	104 000

## Podsumowanie i wnioski

W przypadku analiz prowadzonych metodą *Ekowskaźnika 99* najistotniejszym poziomem minimalizacji destrukcyjnych oddziaływań podczas recyklingu, charakteryzowała się ekologiczność (-6 423,83 Pt) i defunkcyjność (-6 387,53 Pt). Duże obniżenie wielkości szkodliwych wpływów w odniesieniu do destrukcyjności ekologicznej, defunkcyjnej i sozologicznej potwierdza zasadność zastosowania recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego zespołu roboczego wirtualnej elektrowni wiatrowej.

Najmniejsze zużycie paliw kopalnych wyznaczone metodą *Ekowskaźnika 99* i CED, występuje podczas cyklu życia siłowni wiatrowej, w którym jako formę zagospodarowania użytkowego wybrano procesy recyklingu (odpowiednio 190 300 MJ surplus/cykl życia i 204.000 MJ/cykl życia). Również wyniki oceny emisji gazów cieplarnianych w jednym cyklu życia zespołu roboczego wirtualnej elektrowni wiatrowej metodą IPCC potwierdzają, że poziom emisji gazów cieplarnianych jest najniższy dla cyklu życia uwzględniającego recykling (104 000 kg CO<sub>2 eq</sub>/cykl życia), co również wskazuje zasadność wyboru recyklingu, jako formy zagospodarowania.

Z przeprowadzonych badań i rozważań wynika, że projektowanie i wytwarzanie materiałów i tworzyw winno uwzględniać aspekty zrównoważonego rozwoju, zarówno w czasie, jak i po eksploatacji Wykazano, że elementy konstrukcyjne elektrowni wiatrowych powinny być poddawane recyklingowi częściej niż składowaniu lub spalaniu. Praca potwierdza prognozy innych badaczy, że recykling materiałów stanie się w najbliższej przyszłości normą, a składowanie będzie wykorzystywane wyłącznie do zagospodarowania awaryjnego [Pillay i in., 2005; Midilli i in., 2006; Tierney i Gillespie, 2006].

## LITERATURA

- Antonsson A.A., Carlsson H., 1995. The basic for a method to integrate work environment in life cycle assessment. *J. Clean. Prod.*, **3**, nr 4, 215-220. DOI: 10.1016/0959-6526(95)00083-6
- Azapagic A, Clift R, 1999. Allocation of environmental burdens in multiple-function systems. *J. Clean. Prod.*, **7**, nr 2, 135-143. DOI: 10.1016/S0959-6526(98)00046-8
- Blanchard B.S., Fabrycky W.J., 1998. *Systems Engineering and Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- Bovea M., Powell J., 2006. Alternative scenarios to meet the demands of sustainable waste management. *J. Environ. Manage.*, **79**, 115. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.06.005
- Davis S., Peters G.P., Calderia K., 2011. The supply chain of CO<sub>2</sub> emissions. *Proc. Nation. Acad. Sci.*, **108**, nr 45, 18554-18559. DOI: 10.1073/pnas.1107409108
- Goedkoop M., Schryver A., Oele M., Roest D., Vieira M., Durksz S., 2010. *SimaPro 7. Tutorial*. PRÉ Consultants
- Goedkoop M., Spriensma R., 1995. *The Eco-indicator 99. A Damage Oriented Approach for LCIA*. Ministry VROM, The Hague
- Hanssen O.J., Asbjørnsen O.A., 1996. Statistical properties of emission data in life cycle assessment. *J. Clean. Prod.*, **4**, nr 3-4, 149-157. DOI: 10.1016/S0959-6526(96)00041-8
- Midilli A., Diner I., Ay M., 2006. Green energy strategies for sustainable development. *Energy Policy*, **34**, nr 18, 3623-3633. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.08.003
- Piasecka I., 2014: Modele cyklu życia w ocenie destrukcyjności wirnika elektrowni wiatrowej. Cz. I. Podstawy teoretyczne. *Inż. Ap. Chem.*, **53**, nr 2, 103-104
- Pillay S., Vaidya U.K., Janowski G.M., 2005. Liquid molding of carbon fabric reinforced nylon matrix composite laminates. *J. Thermoplast. Comp. Mater.*, **18**, nr 6, 509- . DOI: 10.1177/0892705705054412
- Ragas A.M.J., 1995. Towards a sustainability indicator for production system, *J. Clean. Prod.*, **3**, 123-129. DOI: 10.1016/0959-6526(95)00064-L
- Tierney J., Gillespie J.W., 2006. Modeling of in-situ strength development for the thermoplastic composite tow placement process. *J. Comp. Mater.*, **40**, nr 16, 1487-1506. DOI: 10.1177/0021998306060162

## CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

# INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

*ukazuje się od 1961 roku*

Czasopismo jest poświęcone problemom obliczeń procesowych i zagadnieniom projektowo-konstrukcyjnym aparatury i urządzeń stosowanych w przemysłach przetwórczych, w tym szczególnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, rolno-spożywczym, jak również w energetyce, gospodarce komunalnej i w ochronie środowiska.

Przeznaczone jest zarówno dla pracowników badawczych, projektantów, konstruktorów, jak i dla menadżerów oraz inżynierów ruchowych.

W czasopiśmie publikowane są artykuły o szerokim spektrum tematycznym, obejmującym problematykę procesów i operacji jednostkowych inżynierii chemicznej, bio- i nanotechnologie, inżynierię biomedyczną, recykling, bezpieczeństwo procesowe oraz obliczenia i projektowanie aparatów w aspekcie poprawy wydajności, lepszego wykorzystania surowców, oszczędności energii i ochrony środowiska.

Publikowane prace są recenzowane przez specjalistów. Autorzy artykułów opublikowanych w „Inżynierii i Aparaturze Chemicznej” uzyskują 5 punktów (od 17.09.2012) do oceny parametrycznej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Czasopismo jest regularnie abstraktowane w CAS (Chemical Abstracts Service – a division of the American Chemical Society, Columbus, Ohio, USA) i jest indeksowane na platformie SciFinder®:

<http://www.cas.org/products/scifindr/index.html>

w Bazie Polskich Czasopism Technicznych – BazTech:

<http://baztech.icm.edu.pl/wysz.html>

a także w bazie tekstów naukowych elektronicznych i drukowanych:

<http://scholar.google.com>

The scientific and technological journal

## INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

Chemical Engineering and Equipment

*published since 1961*

Journal is devoted to process calculations, construction and designing problems dealing with equipment and devices for process industries, especially chemical, petrochemical, power and food industry, both municipal engineering and environmental protection.

Readership consists of research workers, constructors and designers, managers and engineers.

Papers are dealing with unit operations of chemical engineering, processes and operations in such areas as bio- and nanotechnology, biomedical engineering, recycling, process safety. Scientific research, improved design methods, proper operating and maintenance of various apparatuses and devices are presented considering better capacity, better use of raw materials, energy saving and environmental protection. Papers are revised by professional referees.

Journal homepage: <http://chemical-engineering-equipment.eu>