

■ Dr inż. Agata Wajda,
Zakład Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla

■ Dr hab. inż. Tomasz Jaworski,
Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śląska

Zagospodarowanie odpadowych paneli fotowoltaicznych

Perspektywy i wyzwania

Dynamicznie rozwijający się rynek technologii fotowoltaicznych sprzyja znacznym przyrostom mocy zainstalowanej. Ta globalna tendencja będzie się wiązała także z ustanowieniem i rozwojem rynku odpadowych paneli fotowoltaicznych. Istotnym zagadnieniem w tym kontekście będzie określenie ram systemu zagospodarowania wycofanych z obiegu paneli fotowoltaicznych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych, środowiskowych i organizacyjnych.



W ostatnich latach miał miejsce dynamiczny wzrost rynku fotowoltaicznego, zarówno w ujęciu krajowym, jak i globalnym. Jedną z ważniejszych przyczyn tej tendencji jest znaczny rozwój technologii fotowoltaicznych, co przekłada się na spadek cen. Generalnie można stwierdzić, że ta forma pozyskiwania energii elektrycznej stała się konkurencyjna cenowo w odniesieniu do źródeł energii nieodnawialnej. W niektórych rejonach świata jest wręcz tańsza niż produkcja energii elektrycznej z wykorzystaniem konwencjonalnych paliw [1]. Ostatnie kilka lat to znaczny przyrost mocy zainstalowanych w Polsce i na świecie. W 2020 r. całkowita moc zainstalowana w fotowoltaice wyniosła w Polsce 3936 MW, a wzrost w odniesieniu do roku poprzedniego to 2463 MW, co dało 4. miejsce w Europie pod względem przyrostu mocy zainstalowanej PV [2,3]. Tendencja wzrostowa jest charakterystyczna także dla Europy, gdzie w 2020 r. w krajach Unii Europejskiej całkowita moc zainstalowana wyniosła 153 GW, a przyrost mocy wyniósł 18,8 GW [3]. W Polsce, jak i w innych krajach posiadających liczne instalacje fotowoltaiczne, jest to spowodowane m. in. korzystaniem z różnego rodzaju dofinansowań przez użytkowników indywidualnych, a także firmy oraz instytucje państwowe.

Perspektywa dla fotowoltaiki w Polsce jest bardzo obiecująca. Według [2,4] w 2025 r. moc zainstalowana w fotowoltaice osiągnie poziom 15 GW. Analogiczna sytuacja ma miejsce w ujęciu globalnym, chociaż rozwój nie jest rów-

nomierny. Do światowej czołówki pod względem przyrostu mocy należą Chiny, USA, Niemcy, Japonia, Australia. Szacuje się, że w 2050 r. udział energii elektrycznej wyprodukowanej z wykorzystaniem technologii PV ma wynieść 25% globalnego zapotrzebowania na energię elektryczną. Znaczny udział źródeł odnawialnych w prognozach przyszłej konsumpcji wskazuje, że energia słoneczna będzie jednym z kluczowych elementów mixu energetycznego. Wartością dodaną będzie także znaczne obniżenie emisji CO₂, co wpisuje się w działania na rzecz klimatu. Polska jest jednym z liderów europejskiego rynku fotowoltaicznego w kontekście zwiększania liczby instalacji fotowoltaicznych. Wskazują na to również prognozy, których rezultaty przywołano na rysunku 1 [1-3].

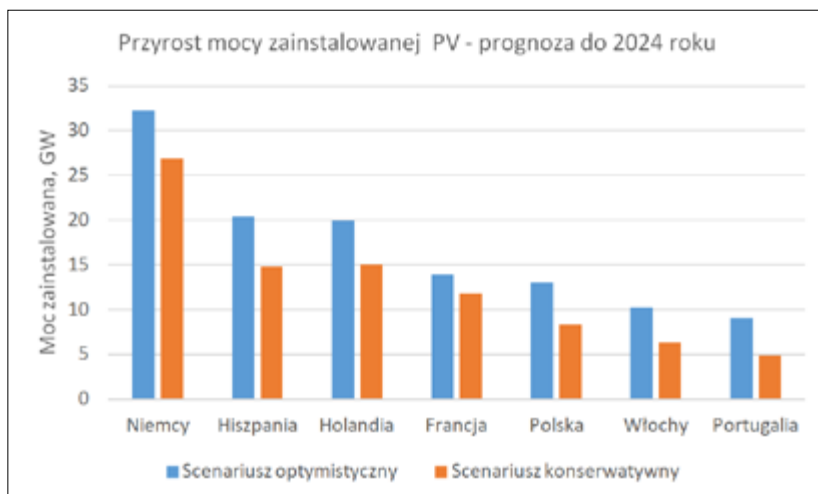
Zakłada się znaczny przyrost mocy zainstalowanej w krajach UE. Polska jest jednym z liderów tego wzrostu z szacowanym przyrostem mocy zainstalowanej mieszczącym się w przedziale 8-13 GW. W predykcji zastosowano scenariusz optymistyczny i konserwatywny, który może inaczej być nazwany jako minimum i maksimum. Jak zaobserwowano w opracowaniu [1], w tego typu analizach predykcyjnych uzyskane wartości rzeczywiste najczęściej mieściły się w zakresie wyznaczonym przez scenariusze minimum i maksimum. Znaczna ilość instalacji fotowoltaicznych będzie wymagała zagospodarowania po okresie użytkowania. Jedną z metod może być recykling paneli fotowoltaicznych, który pozwala na odzyskanie takich materiałów jak: szkło, pla-

stik, czy metale. Z uwagi na długi okres użytkowania produktu, jakim są panele fotowoltaiczne, zagospodarowanie odpadowych paneli fotowoltaicznych nie jest jeszcze usystematyzowane. Jedynie w Unii Europejskiej wprowadzono pewne ogólne ramy prawne.

Zagospodarowanie paneli fotowoltaicznych

Na rynku dostępnych jest wiele technologii fotowoltaicznych, które umownie są klasyfikowane w obrębie trzech generacji: I, II i III. Do pierwszej generacji należą panele z krzemu krystalicznego - mono- i polikrystaliczne. Stanowią one zdecydowaną większość obecnie produkowanych i instalowanych paneli. Dzięki stosunkowo niskiej cenie i wysokiej sprawności często wygrywają z konkurencyjnymi rozwiązaniami. Druga generacja ogniw fotowoltaicznych obejmuje technologie cienkowarstwowe: ogniwa oparte na krzemie amorficznym oraz ogniwa bez krzemowe- CIGS (selenek miedziowo-indowo-galowy), CdTe (tellurek kadmu), perowskitowe. Jest to zróżnicowana grupa ogniw nie produkowanych na bazie krzemu krystalicznego. Produkty tu zaliczane charakteryzują się niższą sprawnością niż urządzenia fotowoltaiczne I generacji, natomiast proces produkcyjny jest tańszy oraz pozwalający na zmniejszenie zużycia półprzewodników. Do ostatniej generacji należą ogniwa barwnikowe, które są oparte na zjawisku fotosyntezy. Ogniwa te składają się z nanokomórek zawierających synte-





Rys. 1. Predykcja przyrostu mocy zainstalowanej w PV w wybranych krajach Europy w latach 2021-2024 [2,3]

tyczny barwnik, który do pewnego stopnia przypomina chlorofil. W porównaniu do ogniw fotowoltaicznych I i II generacji charakteryzują się dużą elastycznością i lekkością, ale też niską sprawnością, wytrzymałością oraz żywotnością [4-7].

Okres użytkowania paneli fotowoltaicznych szacowany jest na 20-35 lat. Zagospodarowanie wycofanych z użytkowania paneli fotowoltaicznych przewiduje różne możliwości. Podobnie jak w przypadku odpadów, wymienia się tu: zapobieganie powstawaniu, ponowne wykorzystanie, recykling, składowanie. Zapobieganie powstawaniu w tym ujęciu rozumiane jest jako wdrażanie coraz to bardziej zaawansowanych technologii produkcji, które mają na celu wykorzystywanie możliwie najmniejszej ilości surowców. Najważniejszymi elementami systemu gospodarki poużytkowymi panelami fotowoltaicznymi będą recykling oraz - w mniejszym stopniu - ponowne wykorzystanie [6-8].

Sposób zagospodarowania tego rodzaju odpadu jest zależny od uwarunkowań prawnych. W większości państw panele fotowoltaiczne są traktowane jako odpad ogólny, co umożliwia zastosowanie różnych metod postępowania z odpadem, w tym także bezpośrednio składowanie. W niektórych krajach trwają dyskusje nad spójnym prawem

dotyczącym gospodarki odpadowymi panelami fotowoltaicznymi. Dotyczy to w szczególności krajów o dużym udziale instalacji fotowoltaicznych, które w perspektywie kilkudziesięciu lat przewidują znaczny przyrost zainstalowanych mocy. Wśród nich wymienić można: USA, Japonię, Australię, czy Koreę Południową. Inna sytuacja ma miejsce w państwach Unii Europejskiej, w której ramy działania w tym zakresie zostały ustalone. Na mocy dyrektywy 2012/19/UE urządzenia fotowoltaiczne zaliczono do grupy zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny (WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment) [9]. Zgodnie z tym dokumentem zagospodarowanie paneli fotowoltaicznych wymaga uzyskania 85% sprawności w odzyskiwaniu surowców wtórnych. Dodatkowy aspekt to nałożenie odpowiedzialności pokrycia kosztów zbiórki oraz recyklingu na producentów paneli fotowoltaicznych.

Metody recyklingu paneli słonecznych I generacji obejmują trzy różne typy procesów - przetwarzanie mechaniczne, termiczne lub chemiczne. W innym podejściu można określić trzy etapy recyklingu:

- usunięcie aluminiowej ramy, okablowania i puszki przyłączeniowej,
- oddzielenie szkła od płytki krzemowej w procesie termicznym, mechanicznym lub chemicznym,

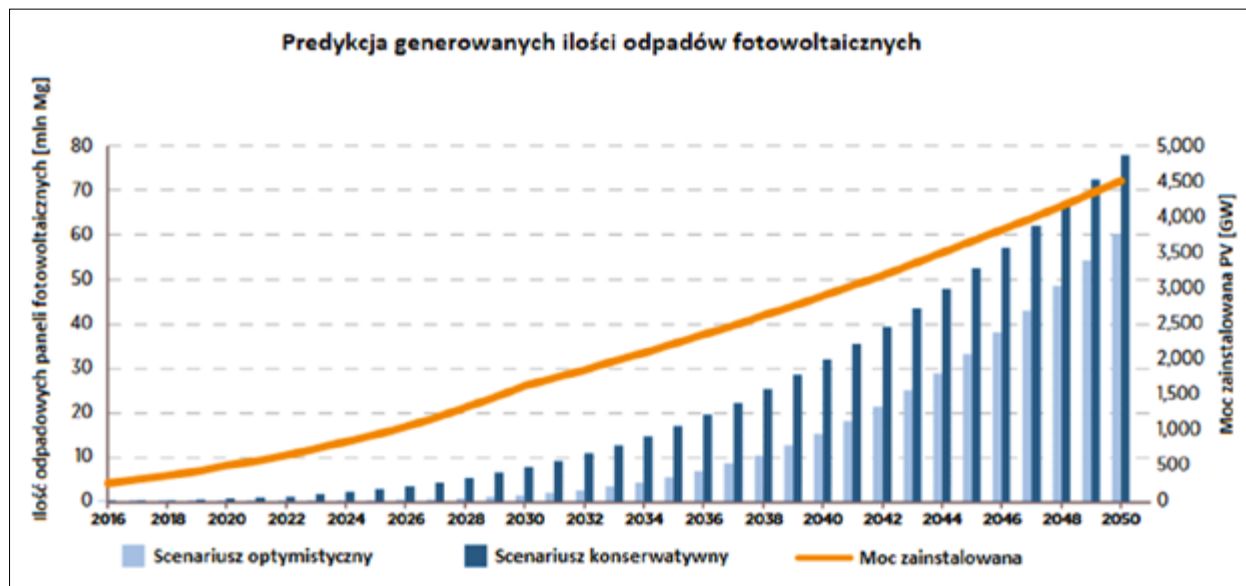
- oddzielenie i oczyszczenie ogniw krzemowych i metali specjalnych (np. srebra, cyny, ołowiu, miedzi) za pomocą technik chemicznych i elektrycznych.

Cienkowarstwowe panele, które stanowią zdecydowanie mniejszą część rynku energii słonecznej, wymagają pewnych modyfikacji procesów recyklingu. Niemniej należy zauważyć, że obecnie w obu rozpatrywanych przypadkach recykling paneli fotowoltaicznych nie zachodzi na szeroką skalę, a ma on raczej charakter demonstracyjny [5-8, 10].

Oprócz recyklingu, jako metodę zagospodarowania wycofanych z eksploatacji paneli użytkowych, rozpatruje się także ich ponowne wykorzystanie. Może ono mieć miejsce bezpośrednio po oddaniu przez użytkownika lub po przystosowaniu. Przewidywany okres użytkowania paneli fotowoltaicznych nie oznacza, że po zakończeniu użytkowania urządzenie to nie jest w stanie generować energii elektrycznej. Powodem oddania często będzie zmniejszenie sprawności produktu. Stąd przewiduje się powstanie rynku wtórnego paneli fotowoltaicznych, które po uprzednim przystosowaniu mogłyby zostać wykorzystane [1, 4, 5].

Perspektywy i wyzwania

Zgodnie z predykcją zawartą w [1, 3] rozwój technologii fotowoltaicznych będzie dynamiczny w kolejnych latach. Zwiększeniu inwestycji w fotowoltaikę będzie towarzyszyć wzrost ilości odpadów paneli fotowoltaicznych, spowodowany przede wszystkim wymianą modułów o obniżonej sprawności, dla których zakończył się przewidywany okres użytkowania, na produkty zaawansowane technologicznie. W konsekwencji konieczne będzie opracowanie i wdrożenie systemu gospodarowania odpadami tego rodzaju. To zjawisko jest globalne, a w przypadku krajów UE wynika ponadto z implementacji prawa unijnego. Obecnie jednak nie istnieją zorganizowane systemy recyklingu paneli



Rys. 2. Prognoza ilości odpadowych paneli fotowoltaicznych [1]

fotowoltaicznych, ani nie ustanowił się rynek wtórny. Recykling użytkowanych paneli ma miejsce w nielicznych instalacjach, na przykład Veolia we współpracy z PV Cycle przetwarza znikome ilości paneli fotowoltaicznych [11]. Państwa europejskie, w tym Polska, są zainteresowane utworzeniem zestawu procedur i procesów dedykowanych recyklingowi paneli fotowoltaicznych. Obecnie nie zidentyfikowano instalacji recyklingu paneli PV na dużą skalę. Jest to nowe wyzwanie dla przemysłu fotowoltaicznego, zwłaszcza w krajach, w których udział tego typu przedsięwzięć i instalacji wzrasta, tj. w Chinach, Japonii i Niemczech. Zwiększenie ilości instalacji fotowoltaicznych będzie się wiązać z narastającą ilością odpadów paneli fotowoltaicznych, co zostało przedstawione na rysunku 2 [1].

Jak można zauważyć, udział odpadów paneli fotowoltaicznych będzie stale się zwiększał, przy czym znaczące przyrosty w skali globalnej będą miały miejsce po 2030 r. Efektem tego będzie konieczność opracowania systemu gospodarowania odpadami PV ze szczególnym uwzględnieniem przemysłowego recyklingu oraz na mniejszą skalę - rynku wtórnego umożliwiającego

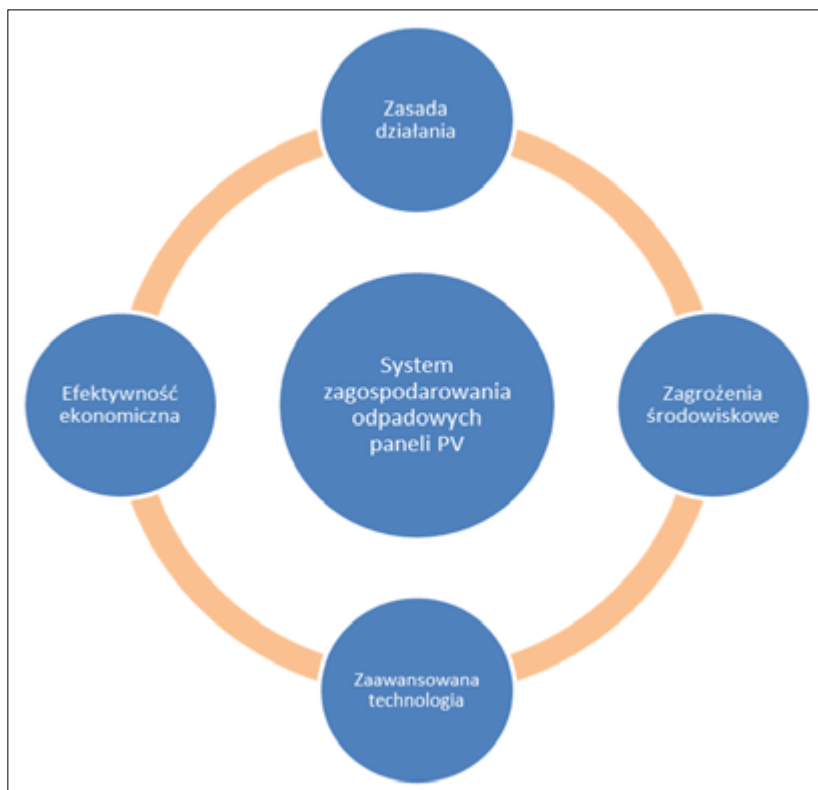
go ponowne wykorzystanie. Konieczne będzie zapewnienie odpowiedniej infrastruktury oraz kadry realizującej system zagospodarowania tym odpadem, co według prognoz przyczyni się do stworzenia nowej, istotnej gałęzi gospodarki [1, 5].

Wprowadzenie systemu wraz z niezbędną infrastrukturą jest samo w sobie ogromnym wyzwaniem. Aktualnie bowiem taka infrastruktura i dedykowany system nie istnieje. Należy spodziewać się w najbliższych latach intensyfikacji działań w tym zakresie, przede wszystkim w państwach UE. Wynikające z dyrektywy o WEEE cele będą wspólne dla wszystkich krajów, niemniej lokalne uwarunkowania najprawdopodobniej wpłyną na pewne różnice w kształcie implementowanego systemu zagospodarowania odpadów paneli fotowoltaicznych. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych 10-15 lat nastąpi znaczny rozwój branży recyklingu fotowoltaicznego, również w Polsce [1, 4, 6].

W ramach tworzenia systemu można wyróżnić kilka aspektów systemu zagospodarowania odpadów paneli fotowoltaicznych. Na rysunku 3 zestawiono elementy, które są istotne z punktu widzenia implementacji systemu.

Zagrożenia środowiskowe w przypadku znacznej ilości specyficznego odpadu, jakim są panele fotowoltaiczne, mogą przybierać różne formy. Wprowadzenie sprawnego systemu zagospodarowania przewidującego ponowne wykorzystanie lub recykling pozwoli na zminimalizowanie składowania, a także oszczędność surowców pierwotnych. Niewłaściwe gospodarowanie odpadowymi panelami fotowoltaicznymi może doprowadzić do przedostania się metali ciężkich w nich zawartych do środowiska. Istotne jest zatem opracowanie systemu zapewniającego bezpieczne przetwarzanie [7].

Wyzwaniem technologicznym jest dostosowanie się do różnorodności typów i rozmiarów użytkowanych paneli fotowoltaicznych. Technologia recyklingu powinna być opracowana w sposób zapewniający przemysłowy recykling różnych rodzajów odpadów fotowoltaicznych. Wiąże się to z innym, istotnym zagadnieniem, a mianowicie opłacalnością. W obecnej sytuacji przewiduje się, że przetwarzanie paneli fotowoltaicznych powinno mieć miejsce w dużych zakładach ze względu na zapewnienie dużego strumienia odpadów. Z punktu widzenia opłacalności recyklingu ma-



Rys. 3. Aspekty systemu zagospodarowania odpadowych paneli fotowoltaicznych

sa przetworzonych paneli fotowoltaicznych jest bardzo ważna, gdyż nakłady inwestycyjne będą bilansowane przez wpływy tytułem sprzedaży odzyskanych surowców. Należy jednak wspomnieć, że aktualny trend oszczędzania surowców wykorzystywanych w procesie produkcji modułów fotowoltaicznych paradoksalnie nie wpływa pozytywnie na

efektywność ekonomiczną recyklingu, gdyż zmniejsza jego potencjalną opłacalność. Materiały, które zostają stopniowo ograniczane w produkcji (głównie srebro, miedź, metale ziem rzadkich), są droższe niż inne pozostałe. Im więcej ich uda się odzyskać, tym bardziej wartościowe produkty się otrzymuje [4-8]. W przypadku jednak braku pewności

zwrotu inwestycji, nie należy się spodziewać zarzucenia realizacji systemu recyklingu i ponownego wykorzystania wycofanych z użytkowania paneli fotowoltaicznych. Rola fotowoltaiki oraz ilość generowanych odpadów PV będzie na tyle znaczna, że nie da się uniknąć wprowadzenia systemowego rozwiązania. Rozwój technologii recyklingu może doprowadzić do zmniejszenia kosztów inwestycyjnych. Pozostaje także kwestia opłaty za zagospodarowanie poużytkowych paneli, którą co do zasady ponosi producent, jednak w praktyce nie spotkano się z określeniem zasad działania takiego rozwiązania [1, 10].

Podsumowanie

Dynamiczny rozwój energetyki opartej na źródłach odnawialnych sprzyja zwiększeniu inwestycji w fotowoltaikę. Obok energetyki wiatrowej, rynek modułów fotowoltaicznych jest jednym z najszybciej rozwijających się. Ma to przełożenie na przyrost mocy zainstalowanej w PV, co jest tendencją globalną. W perspektywie czasowej będzie się to wiązało ze zwiększającą się ilością odpadów paneli fotowoltaicznych. Znaczny przyrost odpadów będzie wymagał systemowego rozwiązania opartego o dedykowane technologie z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych oraz środowiskowych. □

Literatura

1. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels 2016. International Renewable Energy Agency IRENA, International Energy Agency IEA. Strona: www.irena.org.
2. Raport Rynek fotowoltaiki w Polsce. Instytut Energetyki Odnawialnej, maj 2021.
3. Solar Power Europe - Leading the Energy Transition. Strona: www.solarpowereurope.org.
4. Włodarczyk, R. Analysis of the Photovoltaic Waste-Recycling Process in Polish Conditions—A Short Review. Sustainability 2022, 14, 4739. <https://doi.org/10.3390/su14084739>.
5. Chowdhury, M.S.; Rahman, K.S.; Chowdhury, T.; Nuthammachot, N.; Techato, K.; Akhtaruzzaman, M.; Tiong, S.K.; Sopian, K.; Amin, N. An overview of solar photovoltaic panels 'end-of-life material recycling. Energy Strategy Rev. 2020, 27, 100431.
6. Ahmadi, M.H.; Baghban, A.; Sadeghzadeh, M.; Zamen, M.; Mosavi, A.; Shamshirband, S.; Kumar, R.; Mohammadi-Khanaposhtani, M. Evaluation of electrical efficiency of photovoltaic thermal solar collector. Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. 2020, 14, 545-565.
7. Huang, B.; Zhao, J.; Chai, J.; Xue, B.; Zhao, F.; Wang, X. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. Sol. Energy 2017, 143, 132-141.
8. Cerchier, P.; Brunelli, K.; Pezzato, L.; Audoin, C.; Rakotoniaina, J.P.; Sessa, T.; Tammaro, M.; Sabia, G.; Attanasio, A.; Forte, C.; et al. Innovative recycling of end of life silicon PV panels: Resielp. Detritus 2021, 16, 41-47.
9. WEEE. Directive 2012/19EU of the European Parliament and of the Council; European Parliament and the Council of the European Union: Brussels, Belgium, 2012.
10. Chen, W.-S.; Chen, Y.-J.; Lee, C.-H.; Cheng, Y.-J.; Chen, Y.-A.; Liu, F.-W.; Wang, Y.-C.; Chueh, Y.-L. Recovery of Valuable Materials from the Waste Crystalline-Silicon Photovoltaic Cell and Ribbon. Processes 2021, 9, 712.
11. Veolia. Strona: www.veolia.fr.