

Agnieszka ŻELAZNA¹

Agata ZDYB²

Artur PAWŁOWSKI³

PORÓWNANIE WYBRANYCH PANELI FOTOWOLTAICZNYCH NA PODSTAWIE BILANSU MATERIAŁOWO-ENERGETYCZNEGO W ICH CYKLU ŻYCIA

W pracy dokonano porównania dwóch wybranych rodzajów paneli fotowoltaicznych na podstawie danych otrzymanych przy zastosowaniu metody oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment - LCA). Przedstawione zostały główne założenia metodologii LCA, której celem jest badanie wpływu środowiskowego i zrównoważoności. Analizy poświęcone najbardziej popularnym modułom krzemowym (Si) i cienkowarstwowym z tellurku kadmu (CdTe) wykazują, że zużycie materiałów i energii jest mniejsze w przypadku CdTe. Ocena cyklu życia jest to technika zarządzania środowiskowego, która pozwala określić wpływ produktów (dóbr i usług) na środowisko. W pracy, główne założenia tej metody przedstawione są w kontekście fotowoltaiki. Wśród wielu rodzajów modułów fotowoltaicznych, najbardziej rozpowszechnione są moduły Si oraz CdTe i właśnie one zostały porównane. W oby tych przypadkach największe znaczenie w ocenie cyklu życia ma ich produkcja i możliwości recyklingu. Montaż i utrzymanie w czasie eksploatacji ma niewielkie znaczenie w kontekście zużycia materiałów i energii. Analiza pokazuje, że zapotrzebowanie na energię i materiały jest mniejsze w przypadku CdTe niż Si. Oba typy modułów są natomiast jednakowo dobre w kontekście recyklingu ze względu na to, że możliwe jest odzyskanie 90-99% zużytych materiałów. Tak wysoki wynik jest bardzo istotny ponieważ czas życia modułów fotowoltaicznych wynosi 20-30 lat i przeprowadzanie recyklingu jest koniecznością. Analiza cyklu życia systemów fotowoltaicznych pozwala na ocenę ich zrównoważoności.

Słowa kluczowe: moduł PV, LCA, fotowoltaika, zrównoważony rozwój

¹ Agnieszka Żelazna, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4406, a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

² Autor do korespondencji: Agata Zdyb, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4747, a.zdyb@pollub.pl

³ Artur Pawłowski, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081)5381997, tel: (+081)5384409, a.pawlowski@wis.pol.lublin.pl

1. Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na energię skłania naszą cywilizację do zainteresowania nowymi źródłami energii. Szczególną uwagę zwracają odnawialne źródła energii, które charakteryzują się tym, że eksploatacja nie zubaża ich zasobów. Promieniowanie słoneczne wyróżnia się wśród nich ponieważ ilość energii jaka dociera do Ziemi od Słońca w ciągu jednego dnia mogłaby zaspokoić potrzeby naszej planety przez cały rok, przy zastosowaniu odpowiednich metod gromadzenia jej i magazynowania. W ostatnich latach obserwowany jest dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych (PV - Photovoltaics) związany ze spadkiem cen systemów o 52% w latach 2006 – 2011. Należy pamiętać, że obniżenie cen energii wytwarzanej w systemach fotowoltaicznych możliwe jest nie tylko poprzez usprawnienie produkcji efektu finalnego, czyli modułów, ale także wszystkich potrzebnych komponentów. Na rynku obecnie dominują moduły złożone z ogniw krzemowych (ok. 80% rynku), ale coraz bardziej powszechne stają się również moduły cienkowarstwowe (ok. 20% rynku), w których stosowany jest tellurek kadmu CdTe. W pracy wybrano te właśnie dwa rodzaje modułów do porównania na podstawie metody oceny cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment).

2. Metoda LCA

Analiza cyklu życia (LCA) to technika zarządzania środowiskowego, która pozwala na określenie wpływu danych produktów (dóbr i usług) na środowisko. W metodzie tej uwzględniane są wszystkie etapy powstawania, eksploatacji i utylizacji związane z wykorzystywaniem badanego produktu przy czym analizowane jest zużycie materiałów i energii oraz inne efekty środowiskowe. Przy pomocy tej metody można prognozować o ile ograniczona zostanie emisja gazów cieplarnianych dzięki zastosowaniu przyjaznych środowisku technologii słonecznych jak np. moduły fotowoltaiczne i kolektory słoneczne [12].

Analiza cyklu życia w zastosowaniu do systemów fotowoltaicznych pozwala na ich ocenę w kontekście problematyki zrównoważonego rozwoju w trzech powiązanych ze sobą zasadniczych aspektach, takich jak: dostępność materiałów, koszty i wpływ na środowisko. W metodzie LCA wykorzystywane są informacje napływające z firm produkujących moduły fotowoltaiczne oraz pozostałe części systemów PV, dane dotyczące funkcjonowania tych systemów w różnych krajach i warunkach klimatycznych przez dłuższy czas oraz przeprowadzanego recyklingu.

Wczesne analizy wykonywane metodą LCA [1] dawały inne rezultaty niż obecnie. Przykładowo w latach 2005-2006 w literaturze pojawiły się opracowania informujące, że zużycie energii w cyklu życia modułu krzemowego (głównie na etapie produkcji i transportu) wynosi 3700-4200 MJ/ m², a dla cienkowarstwowego CdTe 1200 MJ/m². Oszacowanie ilości emitowanych gazów cie-

plarnianych wyrażonych w jednostce masy odpowiadającej ilości ditlenku węgla ($\text{g CO}_2\text{-eq.}$) dawało następujący wynik: 37-45 $\text{g CO}_2\text{-eq./kWh}$ dla modułów krzemowych oraz 24 $\text{g CO}_2\text{-eq./kWh}$ dla cienkowarstwowych [4, 5]. Obecnie dane wykorzystywane w analizie cyklu życia są coraz bardziej wiarygodne i pochodzą ze znacznie większej liczby źródeł.

3. Rodzaje ogniw słonecznych

Rozwój fotowoltaiki zmierza do dwóch głównych celów: obniżenia kosztów i zwiększenia wydajności ogniw. Badania prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie doprowadziły do dużego zróżnicowania ogniw słonecznych, które obecnie można podzielić na cztery generacje: I- ogniwa krzemowe (monokrystaliczne i multikrystaliczne), II - cienkowarstwowe, III – organiczne i barwnikowe (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells), IV – sensybilizowane kropkami kwantowymi. Wartości parametrów charakteryzujących ogniwa wykonane z różnych materiałów i należące do kilku generacji przedstawia tabela 1. Spośród zaprezentowanych w tabeli ogniw, największe znaczenie komercyjne mają ogniwa krzemowe, a od pewnego czasu również cienkowarstwowe wykorzystujące CdTe. Z tego właśnie względu analizy przeprowadzone w dalszej części pracy poświęcone są modułom złożonym z tych dwóch rodzajów ogniw.

4. Analiza danych dla modułów krzemowych i CdTe

W ocenie cyklu życia ważne są wszystkie etapy od początku powstawania produktu, poprzez eksploatację, aż do jego likwidacji. W przypadku modułów fotowoltaicznych największy udział w całym bilansie „życia” ma proces ich produkcji oraz późniejszego recyklingu, ponieważ montaż i demontaż jest jednorazowy, a nakłady związane z eksploatacją są znikome. W dalszej części pracy omówione jest zużycie materiałów i energii w procesie wytwarzania modułów krzemowych i cienkowarstwowych CdTe, a także recykling obu typów modułów.

Podstawowym surowcem do produkcji modułów krzemowych jest kwarc SiO_2 , który jest redukowany w atmosferze argonu do krzemu metalurgicznego (MG silicon – metallurgical grade silicon). W celu osiągnięcia czystości $>99,9999\%$ jest on poddawany tzw. procesowi Siemens, w którym bloki krzemowe rosną w atmosferze wodoru i trichlorosilanu (SiHCl_3) o temperaturze $1100\text{-}1200^\circ\text{C}$. W zmodyfikowanej wersji tej procedury, zapewniającej mniejsze zużycie energii trichlorosilan jest zastąpiony silanem (SiH_4), który razem z wodorem podgrzewany jest do ok. 800°C . Oczyszczanie w procesie Siemens daje, oprócz krzemu o odpowiedniej czystości, także krzem, który może być stosowany w elektronice (EG silicon – electronic grade silicon) oraz czterochlorek krzemu (SiCl_4) wykorzystywany w produkcji silikonu. W celu otrzymania podłoża do monokrystalicznych ogniw słonecznych krzem klasy EG zostaje stopiony i użyty w procesie Czochralskiego. Powstałe monokryształy są następnie cię-

Tabela 1. Wartości parametrów charakteryzujących ogniwa słoneczne wykonane z różnych materiałów

Table 1. Characteristic parameters of solar cells made of different materials

Rodzaj ogniwa słonecznego	Wydajność komercyjna	Wydajność laboratoryjna	Gęstość prądu zwarcia [mA/cm ²]	Napięcie obwodu otwartego [V]
Krzemowe				
Si monokrystaliczny	15% ^{a)} 22% ^{b)}	23% ^{a)} 24,7% ^{c)} 25% ^{f)}	35 ^{a)} 42,2 ^{c)} 42,7 ^{f)}	0,55 ^{a)} 0,7 ^{c)} 0,706 ^{f)}
Si multikrystaliczny	13% – 15% ^{a)} 14% – 18% ^{b)}	20,3% ^{c)} 20,4% ^{f)}	37,7 ^{c)} 38 ^{f)}	0,6 ^{c)} 0,66 ^{f)}
Cienkowarstwowe				
Si amorficzny	6% – 8% ^{a)} 7,1% ^{b)}	10,4% ^{b)} 9,5% ^{c)}	15 ^{a)} 17,5 ^{c)}	0,8 ^{a)} 0,86 ^{c)}
CdTe	8% ^{a)} 11,2% ^{b)}	16% ^{a)} 16,5% ^{b)} 16,5% ^{c)}	25,9 ^{c)}	0,8 ^{c)}
CIS/CIGS	13% ^{a)} 12,1% ^{b)}	17% ^{a)} 20,3% ^{b)} 18,8% ^{c)}	34 ^{c)}	0,7 ^{c)}
GaAs	23,3% ^{d)}	24,5% ^{c)} 28,8% ^{f)}	28,8 ^{c)} 29,6 ^{f)}	1 ^{c)} 1,05 ^{d)} 1,12 ^{f)}
Wielozłączowe				
GaInP/GaAs	30% – 38% ^{b)} 30,3% ^{d)}	30,3% ^{c)} 38% ^{f)}	14,22 ^{c)} 14,27 ^{f)}	2,48 ^{c)} 2,4 ^{d)} 3,06 ^{f)}
aSi/μcSi	9% ^{b)}	11,7% ^{c)}	2,99 ^{c)}	5,46 ^{c)}
Organiczne	6% ^{b)}	5,15% ^{c)} 8,5% ^{f)}	9,4 ^{c)} 15,87 ^{f)}	0,87 ^{c)} 0,8 ^{f)}
DSSC	2% – 4% ^{b)}	8% – 12% ^{b)e)} 10,4% ^{c)} 15% ^{f)}	21,8 ^{c)} 20 ^{f)}	0,729 ^{c)} 0,99 ^{f)}

Źródło: opracowanie własne na podstawie: a) – [10], b) – [9], c) – [7], d) – [11], e) – [3], f) – [8]
 Source: own elaboration based: a) – [10], b) – [9], c) – [7], d) – [11], e) – [3], f) – [8]

te, trawione, czyszczone, domieszkowane fosforem, a następnie po ich obu stronach nanoszone są srebrne kontakty. Tak otrzymane ogniwa łączone są w warstwie EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), pokrywane szkłem i u-

mieszczane w aluminiowej ramie. Produkcja ogniw wykorzystujących krzem monokrystaliczny wiąże się z powstawaniem ścinków Si już na etapie przygotowywania podłoży. Odpady te w całości mogą być użyte powracając bezpośrednio do procesu wytwarzania monokryształów.

Materiały takie jak kadm i tellur, używane w postaci metalicznej do produkcji cienkowarstwowych modułów CdTe, otrzymywane są jako produkty uboczne przy wytapianiu miedzi i cynku i wymagają dalszego oczyszczania do uzyskania czystości na poziomie 99,999%. Warstwy CdTe, a na nich bardzo cienkie pokrycia CdS nanoszone są poprzez naparowanie na szkło w temperaturze 500-600°C, a następnie tworzone są ich połączenia i tylne kontakty. Dodatkowe zewnętrzne pokrycie szkłem zapewnia wystarczające umocnienie, co eliminuje w tym przypadku konieczność stosowania aluminiowej ramy.

Tabela 2 przedstawia ilościowe zużycie materiałów i energii w obu omawianych typach modułów. Dane liczbowe pokazują, że zarówno ilość materiałów, jak i energii wykorzystywana podczas produkcji jest mniejsza w przypadku modułów cienkowarstwowych.

Tabela 2. Ilość materiałów i energii zużytych podczas produkcji modułów Si i CdTe, na 1 m² modułu, na podstawie [6], [2]

Table 2. The amount of materials and energy consumed in fabrication process of Si and CdTe modules, based on [6], [2]

Moduł CdTe		
Materiały [kg]		Energia [kWh]
Cd	0,01054 *	28,5
Te	0,01154 *	
woda	219	
poliwęglan	0,05	
szkło	19,7	
azot	0,052	
przewody elektryczne	0,215	
Moduł Si		
Materiały [kg]		Energia [kWh]
polikrystaliczny Si	1,15	126,6
Ar	6,2	
zw. chemiczne do czyszczenia powierzchni krzemu np. glikol polietylenowy, NaOH, HCl	3,5	
woda	193	
Al	2,63	
szkło	10,6	
azot	1,52	
przewody elektryczne	0,13	

Moduły fotowoltaiczne są produkowane na skalę komercyjną od lat 80., a ich czas życia wynosi 20-30 lat. W związku z tym rozwój metod recyklingu modułów został wymuszony w sposób naturalny dopiero około roku 2000. W przypadku powszechnie stosowanych modułów krzemowych w recyklingu można odzyskać do 97% materiałów. Mechanicznie oddzielana jest aluminiowa rama modułu, elementy stalowe i miedziane oraz szkło. Najlepsze wyniki w porównaniu do manualnego rozdzielania elementów modułów dają procedury zautomatyzowane. Efektem ich stosowania jest materiał o wysokiej jakości, otrzymany przy niskim zużyciu energii i niskich kosztach. Warstwa kopolimeru EVA, w którym umieszczone są poszczególne ogniwa jest usuwana metodami chemicznymi i termicznymi.

Zużyte cienkowarstwowe moduły CdTe podlegają podobnej procedurze. Są one rozkładane na elementy, a następnie rozdrabniane na małe 5 mm kawałki. Rozdzielenie materiałów półprzewodnikowych wymaga zastosowania metod chemicznych i następuje po wstępnym mechanicznym rozdzielaniu elementów. Warstwy półprzewodników są wytrawiane ze szklanego podłoża, a po oczyszczeniu szkło i warstwa laminatu jest oddzielana. Osobno są usuwane elementy metalowe. Procedura ta pozwala na odzyskanie do 90% szkła i 95% zastosowanych półprzewodników. Przykładowo tellur odzyskiwany jest w 80% i ma on czystość 99.7%, wystarczającą do dalszej sprzedaży i wykorzystania ponownie w panelach [2].

W krajach, w których zastosowania fotowoltaiki są od dawna rozpowszechnione metody recyklingu są powszechnie stosowane, a ich wydajność zapewnia opłacalność zarówno w wymiarze ekonomicznym jak i ekologicznym. Moduły składające się z ogniw wyprodukowanych z całkiem nowych materiałów muszą pracować trzy razy dłużej niż moduły z materiałów z recyklingu o tej samej wydajności, aby wytworzyć energię zużytą na ich wyprodukowanie. Moduły oparte na materiałach z recyklingu są również tańsze.

Stosowanie recyklingu ma istotne zalety w kontekście ochrony środowiska i realizacji koncepcji zrównoważonego rozwoju:

- poprawia społeczny odbiór fotowoltaiki,
- stanowi dodatkowe źródło surowców,
- wpływa na obniżenie kosztów modułów,
- minimalizuje koszty zagospodarowania odpadów w postaci zużytych paneli.

5. Podsumowanie

Zgodnie z prognozami, dynamiczny rozwój rynku fotowoltaiki na świecie doprowadzi do produkcji terawatów mocy z odnawialnego źródła jakim jest Słońce. W związku z tym istotnego znaczenia nabiera ocena technologii fotowoltaicznych w kontekście zrównoważonego rozwoju obejmującego zarówno dostęp do surowców, jak również koszty i ocenę potencjalnych zagrożeń dla środowiska, które mogą być oszacowane przy zastosowaniu metody LCA.

Dane liczbowe dotyczące produkcji wybranych do analizy modułów CdTe i Si pozwalają stwierdzić, że zużycie materiałów i energii jest mniejsze w przypadku CdTe. Recykling obu typów modułów jest bardzo skuteczny i pozwala na odzyskanie 90-99% materiałów.

Literatura

- [1] Alsema E.A.: Energy Payback time and CO₂ Emissions of PV Systems, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 8, 2000, pp. 17-25.
- [2] Anctil A., Fthenakis V.: Recyclability Challenges in "Abundant" Material Based Technologies, Proc. of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Germany 2012, pp. 4352-4358.
- [3] Chiba Y., Islam A., Watanabe Y., Komiya R., Koide N., Han L.Y.: Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11,1%, Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters and Express Letters, vol. 45, 2006, pp. L638-L640.
- [4] Fthenakis V., Alsema E.: Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004-early 2005 Status, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14, 2006, pp. 275-280.
- [5] Fthenakis V.M., Kim H.C., Alsema E.: Emissions from photovoltaic life cycles, Environmental Science and Technology, vol. 41, 2008, pp. 2168-2174.
- [6] Fthenakis V., Kim H.C., Frischknecht R., Rauei M., Sinha P., Stucki M.: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS, 2011.
- [7] Green M.A., Emery K., King D.L. Hishikawa Y., Warta W.: Solar Cell Efficiency Tables, Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 16, 2008, pp. 61-67.
- [8] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D.: Solar cell efficiency tables (version 43), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 22, 2014, pp. 1-9.
- [9] Greenpeace and EPIA Report, Solar Generation 6, Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World, 2011, <http://www.greenpeace.org> [dostęp: 10 marca 2014 r.].
- [10] Nofuentes G., Munoz J.V., Talavera D.L., Aguilera J., Terrados J.: Technical Handbook, in the framework of the PVs in Bloom Project, 2011, ISBN: 9788890231001.
- [11] Olson J.M., Friedman D.J., Kurtz S.: High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells, 360-411, in: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Eds: Luque A., Hegedus S., Wiley 2003.
- [12] Żelazna A., Pawłowski A., Zdyb A.: Carbon footprint of solar systems working in Polish climate conditions, Quare, vol. III, 2013, pp. 2689-2695.

COMPARISON OF PHOTOVOLTAIC PANELS BASED ON THE MATERIAL-ENERGY BALANCE IN THE LIFE CYCLE

Summary

Two types of photovoltaic modules are compared basing on data provided by Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which main assumptions are also described. LCA for photovoltaic technologies aims at analysing the environmental impacts and sustainability. The research related to the most popular Si and CdTe modules show that the consumption of materials and energy is smaller in the case of CdTe.

Life Cycle Assessment (LCA) is a technique of environmental management, which allows to determine the impact of the products (goods and services) on the environment. Main assumptions of such approach are presented in the paper in the context of photovoltaics. Among different types of photovoltaic modules two are the most popular: Si and CdTe, and they are compared in the paper. In both cases the highest share in the LCA is connected with production process and possibilities of recycling after dismantling the modules (since assembly, maintaining and further dismantling have little impact in the context of material and energy use). In the context of production process, the research shows that the consumption of materials and energy is smaller in the case of CdTe than in the case of Si. In the context of recycling both types of modules are very good, since it is possible to recycle about 90-99% of used materials. Such high factor is very important, because the life span of photovoltaic modules is about 20-30 years, so good recycling is a must.

Keywords: PV modules, LCA, sustainable development

DOI:10.7862/rb.2014.122

Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.

Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.