

ŚRODOWISKO

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3-Ś/2009
ZESZYT 11
ROK 106
ISSUE 11
YEAR 106

ANNA ŚLIWIŃSKA, KRYSZYNA CZAPLICKA-KOLARZ*

WYBRANE ASPEKTY METODOLOGII ANALIZY CYKLU ŻYCIA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

SELECTED ASPECTS OF LCA METHODOLOGY IN THE FIELD OF RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu literatury dotyczącej analizy cyklu życia wybranych odnawialnych źródeł energii (OZE). Celem przeglądu była analiza metodyki LCA stosowanej do odnawialnych źródeł energii, zidentyfikowanie obszarów analizy szczególnie istotnych z powodu dużego wpływu na środowisko, jak również obszarów problemowych, które są źródłem rozbieżności wyników. Opisano również oddziaływania nietypowe, często nieuwzględniane w dokonywanych ocenach i analizach.

Słowa kluczowe: analiza cyklu życia, LCA, odnawialne źródła energii

Abstract

Literature concerning the life cycle analysis of selected renewable energy technologies is summarized in the paper. Aims of the review are: studying the methodology of implementation LCA to renewable energy technologies; identifying key elements of analysis with main impacts on environment; identifying hotspots causing inconsistencies in results. Some specific environmental burdens, which are usually not a part of analysis, are listed as well.

Keywords: life cycle analysis, LCA, renewable energy technologies

* Mgr Anna Śliwińska, prof. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka-Kolarz, Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

Oznaczenia

BOS	– Balance of System – elementy systemu fotowoltaicznego bez modułów
CED	– Cumulative Energy Demand – całkowite zapotrzebowanie na energię
EIOLCA	– Economic Input Output Life Cycle Analysis – analiza cyklu życia na podstawie tablic przepływów międzygałęziowych
ER	– <i>energy ratio</i> – iloraz energii wchodzącej i wychodzącej
ER _{net}	– <i>net energy ratio</i> – wartość ER pomniejszona o straty powstałe w wyniku przesyłu, konwersji i magazynowania energii
IOA	– Input Output Analysis – analiza na podstawie tablic przepływów międzygałęziowych
OZE	– Odnawialne Źródła Energii
PCA	– Process Chain Analysis – analiza oparta o łańcuch procesów technologicznych
SoG-Si	– Solar Grade Silicon – krzem produkowany dla potrzeb ogniw fotowoltaicznych

1. Wstęp

Gospodarka oparta na zasadzie zrównoważonego rozwoju powinna dążyć do minimalizacji zużycia zasobów nieodnawialnych i do zastąpienia energii paliw nieodnawialnych energią ze źródeł odnawialnych. Zwiększenie udziału źródeł odnawialnych w tzw. miksie energetycznym Polski jest również zgodne z założeniami polityki energetycznej kraju oraz z dążeniem do minimalizacji emisji dwutlenku węgla oraz innych gazów cieplarnianych. W praktyce zastąpienie paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii nie jest proste. Stosowanie paliw kopalnych związane jest z pewnymi zaletami [1]: względnie niewielka cena, duża gęstość mocy skumulowanej w jednostce masy lub objętości, dostępność, dyspozycyjność, opanowana technologia. Z kolei odnawialne źródła energii, pomimo znacznie mniejszego oddziaływania na środowisko, cechują pewne słabości, które decydują o tym, że nie zdominowały one rynków światowych. Są to: cena, bezpieczeństwo energetyczne, niezawodność i stabilność dostaw energii, zdolność do odpowiedzi na zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną. Ponadto energia odnawialna – wbrew częstej opinii – nie jest całkowicie wolna od emisji i pozostałych oddziaływań na środowisko, jak również powoduje pośrednio zubożenie zasobów, co ujawnia analiza cyklu życia (LCA). Dodatkowo każde z odnawialnych źródeł energii powoduje nietypowe i trudne do oceny oddziaływanie na środowisko. W artykule dokonano przeglądu literatury dotyczącej metodyki i rezultatów analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii.

2. LCA odnawialnych źródeł energii

Ze względu na to, że w przypadku OZE większość oddziaływań na środowisko następuje poza fazą eksploatacji, LCA jest z pewnością odpowiednim narzędziem do szacowania wpływu OZE. Problemy praktyczne [2] związane z LCA odnawialnych źródeł energii to m.in.:

- dostępność aktualnych danych dobrej jakości dotyczących OZE,
- szybki rozwój technologiczny OZE,

- różne zastosowania, np. w połączeniu z systemem magazynowania lub jako element zintegrowany z budynkiem, mający dodatkową funkcję zadaszenia, świetlika,
- silna zależność od warunków lokalnych (naświetlenie, prędkość wiatru itp.) i od sposobu instalacji.

Istotne parametry proceduralne to m.in. zawartość energii w materiałach, zakres i szerokość analizy, metodologia i głębokość analizy oraz inne: specyfika kraju produkcji i użytkowania, stopień recyklingu materiałów, ponowne użycie części wyeksploatowanego urządzenia po ich odnowieniu, wybór materiałów wykorzystanych do budowy urządzenia lub instalacji.

W przypadku odnawialnych źródeł energii głównym źródłem zanieczyszczeń jest etap konstruowania instalacji. W związku z tym może pojawić się problem normalizacji emisji względem całej energii produkowanej w cyklu życia (kg/kWh), a jej rezultaty mocno zależą od założonej długości życia i sprawności urządzenia.

Wszystkie te elementy sprawiają, że analizy cyklu życia dają bardzo rozbieżne wyniki. Zdarza się nawet, że różnice pomiędzy różnymi technologiami odnawialnymi są mniejsze niż rozbieżności w ramach różnych sposobów analizy pojedynczej technologii. Rozbieżności metodologiczne różnych OZE należy wyeliminować w celu umożliwienia porównywania efektów związanych z procesami poprzedzającymi i następczymi różnych systemów [3]. Zaleca się stosowanie techniki hybrydowej w celu uzyskania kompletności systemu w przypadku napotkania problemu wyboru granic systemu produkcyjnego. Istotne może być także uwzględnienie magazynowania energii [4]. Zwiększa ono zużycie energii i emisję, ale umożliwia porównanie technologii z węglem i energią jądrową – w innym wypadku porównanie ze względu na różnicę obciążenia i dostępności jest niepełne.

Jednostką funkcjonalną dla LCA odnawialnych źródeł energii jest najczęściej kWh produkowanej energii dostarczonej do sieci lub kWh zgłaszanego zapotrzebowania.

2.1. Turbiny wiatrowe

Turbina wiatrowa przetwarza energię kinetyczną wiatru pochodzącą z energii słonecznej na energię mechaniczną (pracę obrotową wirnika), która z kolei jest przekazywana przez wał i przekładnię do generatora i przekształcana w energię elektryczną. Rezultaty LCA turbin wiatrowych różnią się nawet o rząd wielkości. Na podstawie przeprowadzonego w [3] przeglądu literatury dotyczącej LCA turbin wiatrowych, jak również [5], stwierdzono, że częstą przyczyną rozbieżności wyników różnych analiz pojedynczej technologii są różne cechy turbiny i założenia metodologiczne LCA. Wpływ na wyniki mają m.in.:

- czas życia i moc turbiny,
- wysokość i konstrukcja wieży – im wyższa wieża, tym większa prędkość wiatru,
- rodzaj turbiny i zastosowane materiały,
- sprawność wytwarzania energii, straty, np. wewnętrzne sieci farm wiatrowych, transformatory,
- lokalizacja i rodzaj podłoża, które mają wpływ na ilość materiałów konstrukcyjnych – np. podłoże piaszczyste wymaga więcej materiałów, warunki hydrogeologiczne wpływają na wysokość wieży,
- warunki naturalne – siła i kierunek wiatru mają wpływ na czas pracy,
- zmienność zapotrzebowania energii w lokalnej sieci oraz współczynnik obciążenia,
- rok instalacji turbiny,

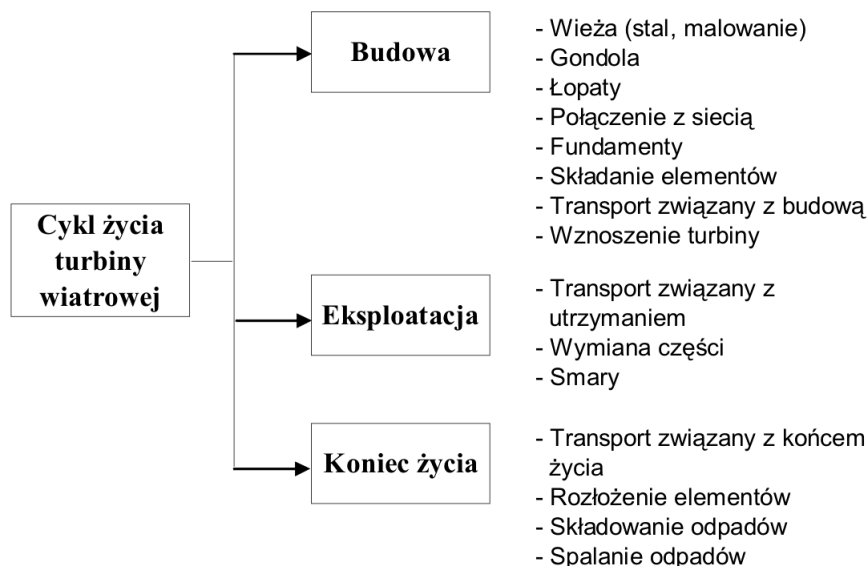
- metodologia i zakres analizy,
- różnice założeń dotyczących kraju wytwarzania materiałów i samej instalacji – w różnych krajach w różny sposób otrzymuje się stal, różny jest skład stali i miksy energii zużywanej w procesach, różne są uzyskiwane wartości stopnia recyklingu.

Wszystkie wymienione elementy mają wpływ na koszt instalacji, ilość i rodzaj zużytych materiałów, a tym samym wpływ na środowisko naturalne, funkcjonalność turbiny i jej estetykę. Podobnie w [6] wymieniono następujące punkty krytyczne analizy:

- etap budowy – trudność w oszacowaniu ilości zużytych materiałów,
- etap końca życia – zagadnienia związane z recyklingiem turbiny, m.in. łopat.

Dobrym sposobem na obniżenie kosztów wytwarzania, jak również oddziaływania na środowisko, jest odnowienie i ponowna instalacja części turbiny, np. łopat wirnika, piasty, siłownika i in. Rozwiązanie to zostało zastosowane w duńskich parkach wiatrowych. Zabieg ten pozwala wydłużyć czas życia, np. z 25 do 50 lat, a ponowna instalacja wymaga jedynie 20% energii, jaka byłaby potrzebna do budowy. Recykling turbiny (stali, miedzi, aluminium) ma duży wpływ na rezultaty, z kolei recykling łopat jest kłopotliwy, ponieważ odzyskane tworzywo ma gorszą jakość, może więc służyć jedynie jako wypełniacz. Również recykling termiczny łopat (spalanie) nie jest dobrym rozwiązaniem, ponieważ w wyniku spalania polichlorku winylu powstają toksyczne związki.

W [6] przeprowadzono analizę cyklu życia energii elektrycznej produkowanej przez turbiny wiatrowe. Wzięto pod uwagę etapy budowy, eksploatacji i końca życia instalacji. Schemat cyklu życia turbiny wiatrowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat cyklu życia turbiny wiatrowej (źródło: opracowanie własne na podstawie [6])

Fig. 1. Life cycle of wind turbine

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w przypadku turbin wiatrowych największy wpływ na środowisko wywiera etap budowy wieży (60–90% emisji). Wielkość

oddziaływania etapu budowy fundamentów zależy od podłoża. Procesy transportu są również dość istotne ze względu na ciężar wieży i pozostałych elementów.

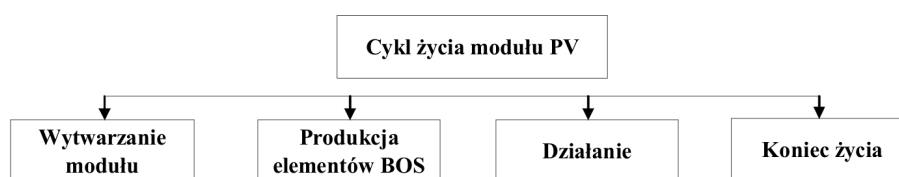
Nietypowe aspekty środowiskowe energetyki wiatrowej to:

- zagospodarowanie terenu i wykorzystanie gruntów,
- efekty wizualne i wpływ na krajobraz,
- hałas,
- wpływ na ptaki i zwierzęta morskie,
- niszczenie naturalnych siedlisk,
- wibracje,
- powstawanie aerozoli,
- problemy z widocznością,
- odbijanie fal i cząstek,
- zakłócanie komunikacji elektromagnetycznej,
- podwodny hałas i wibracje,
- wypadki.

Wszystkie te oddziaływania są związane z etapem wytwarzania energii i mogą być rozważane jako koszty zewnętrzne. Przykładowo, w LCA farmy wiatrowej [7] obliczono koszty zewnętrzne związane z hałasem, widocznością i wypadkami, w tym ptaków.

2.2. Ogniwa fotowoltaiczne

W ogniwach słonecznych wykorzystuje się zjawisko fotowoltaiczne, a energia promieniowania słonecznego jest zamieniana w energię elektryczną. Ogniwo jest zbudowane z materiału półprzewodnikowego, najczęściej krzemu. W wyniku pracy ogniwa otrzymuje się prąd o niskim napięciu (ok. 0,5 V), ale dużym natężeniu zależnym od natężenia promieniowania słonecznego (ok. 3 A). Ogniwa są zazwyczaj charakteryzowane przez maksymalną moc osiąganą przy najkorzystniejszych warunkach instalacji i nasłonecznienia (*peak power*, wyrażana w W_p). Sprawność ogniw waha się w granicach 5–15% zależnie od zastosowanego materiału. Wielkość energii wytwarzanej przez ogniwo ulega zmianom



Rys. 2. Cykl życia modułu PV (źródło: opracowanie własne na podstawie [10])

Fig. 2. Life cycle of PV system

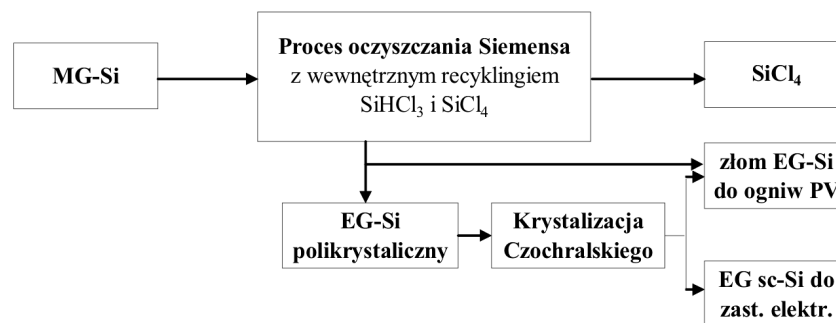
dobowym i sezonowym. W rezultacie to, czy wyniki LCA będą wiernie oddawały rzeczywiste oddziaływanie ogniwa na środowisko w cyklu życia, będzie zależne od trafności założeń analizy w porównaniu z faktycznymi warunkami ich pracy. Rzeczywiste osiągi zależą od wielu czynników, w tym:

- lokalizacji – natężenie promieniowania słonecznego zmniejsza się od równika ku biegunom,
- temperatury – charakterystyka półprzewodnika zależy od temperatury,

- montażu – istotny jest kąt nachylenia instalacji, pozycja i orientacja ogniwa, obecność elementów, które mogą zasłaniać ogniwo i utrudniać dostęp światła,
- zastosowania ogniwa i stopnia jego wykorzystania, gdyż ogniwa nie pozwalają na magazynowanie energii w chwilach zmniejszonego zapotrzebowania.

Podstawowe etapy cyklu życia ogniw fotowoltaicznych to: wytwarzanie modułów, BOS, etap instalacji i eksploatacji oraz koniec życia ogniw (rys. 2).

Najważniejszym etapem cyklu życia jest produkcja modułu, w tym przede wszystkim produkcja krzemu. Założenia i metodologia zastosowane do procesu produkcji krzemu mają kluczowy wpływ na rezultaty analizy i mogą być przyczyną znacznych rozbieżności wyników. Wynika to z tego, że duża część krzemu stosowanego w ogniwach pochodzi z bardzo energochłonnego procesu produkcji wysokiej czystości krzemu do mikrochipów (proces Siemens) i z procesu krystalizacji krzemu Czochralskiego. Krzem stosowany do ogniw fotowoltaicznych jest w tych procesach odpadem (rys. 3).



Stosowane oznaczenia: sc-Si – monokrystaliczny krzem, EG-Si – krzem czysty dla elektroniki, MG-Si – *metallurgical grade*, krzem technicznie czysty

Rys. 3. Produkty procesów oczyszczania i krystalizacji krzemu
(źródło: opracowanie własne na podstawie [10])

Fig. 3. Purification of MG-Si

W związku z tym w analizie można zastosować dwa sposoby alokacji zanieczyszczeń z procesu pomiędzy krzemem wysokiej czystości do elektroniki i krzemem niższej czystości stosowanym w fotowoltaice:

- alokacja zgodna z masą produktu,
- alokacja zgodna z wartością produktu.

Decyzja o sposobie alokacji jest istotna – w przypadku alokacji masowej wartość CED wynosi 9 500 MJ/m² modułu, dla alokacji finansowej, ze względu na to, że złom ma prawie czterokrotnie mniejszą wartość, CED = 2 000–3 000 MJ/m² modułu.

Problem alokacji dla etapu produkcji krzemu jest opisany również w artykule [8], którego celem było porównanie elektrowni wiatrowych i słonecznych.

W celu obniżenia kosztów procesu konwencjonalnego otrzymywania krzemu opracowano nową technologię otrzymywania krzemu dla ogniw słonecznych w sposób niezależny od produkcji półprzewodników. Proces opracowało pod koniec ubiegłego wieku stowarzyszenie Solar Grade Silicone Research Association (SOG w Tokio) przy współpracy z New Energy Industrial Technology Development Organization, a próby pilotowe zakończono w 2000 r. [9]. Obecnie w świecie prowadzone są przez różne organizacje prace

dążące do udoskonalenia analogicznych procesów. Krzem o czystości „solar grade”, będący produktem procesu stowarzyszenia SOG, okazał się mniej energochłonny niż krzem czysty do zastosowań elektronicznych otrzymywany w wyniku procesu Siemens. W związku z tym wyniki LCA dla ogniw fotowoltaicznych w literaturze bardzo się różnią w rezultacie przyjmowania różnych wartości zapotrzebowania na energię w procesie produkcji krzemu: zapotrzebowanie rzędu 6000–13900 MJ/m² dla krzemu monokryształicznego oraz 4200–11600 MJ/m² dla krzemu polikryształicznego [2].

Kolejnym źródłem rozbieżności na etapie produkcji ogniw jest recykling chlorosilanów powstających w trakcie procesów oczyszczania. Istotne są również recykling aluminium i metali żelaznych oraz recykling całego modułu.

Obserwuje się nieustanny i szybki rozwój technologii w dziedzinie fotowoltaiki, tj. zwiększenie sprawności modułu, zmniejszenie masowego zużycia krzemu w ogniwach, zwiększenie efektywności cięcia, recykling wewnętrzny odpadów krzemowych, nowe technologie oczyszczania krzemu. Ze względu na to bardzo ważne dla analizy jest stosowanie aktualnych danych, a takie są trudne do uzyskania, zwłaszcza dla etapu końca życia oraz procesów recyklingu.

Analiza cyklu życia ogniw fotowoltaicznych [10] wykazała, że oddziaływanie na środowisko, w tym emisja gazów cieplarnianych oraz ilość energii zużywanej w cyklu życia, są uzależnione od sposobu montażu ogniwa. Stwierdzono, że ogniwa zintegrowane z budynkiem, np. poprzez montaż na dachach lub fasadach budynków, wypadają korzystniej niż wolno stojące ze względu na to, że wymagają mniejszej ilości materiałów do ich instalacji oraz nie zajmują dodatkowo terenu. Z tego samego powodu wśród ogniw zintegrowanych z budynkiem korzystniejsze są instalacje wbudowane, które nie wymagają odrębnych ram, oraz półprzezroczyste, pełniące rolę świetlików. Pozostałe parametry mające wpływ na rezultaty LCA dla ogniw fotowoltaicznych to:

- założona sprawność, zależna od wymienionych wyżej czynników,
- rodzaj krzemu (złom EG-Si czy SoG-Si),
- zastosowana technologia produkcji krzemu,
- grubość warstwy krzemu,
- typ instalacji – wolno stojąca czy zintegrowana z budynkiem, panel lub laminat, rodzaj materiału zastosowanego do ramy,
- współwytwarzanie ciepła (*Heat Recovery Unit*).

Wyniki zależą także od stosowanego do produkcji ogniwa i innych elementów miksu energetycznego, długości życia i efektywności modułu, efektywności cięcia wafli krzemowych.

Często nieuwzględniane w analizach aspekty związane z tym zagadnieniem to:

- wykorzystanie gruntów,
- efekty wizualne.

Efekty te mają mniejsze znaczenie w przypadku montażu na istniejących konstrukcjach (np. dachach), ale dla instalacji wolno stojących mogą mieć duże znaczenie.

Jednostką funkcjonalną, zamiast kW wyprodukowanej energii, może być m² modułu. W literaturze zwraca się także uwagę na aspekty związane z systemem magazynowania energii zintegrowanym z ogniwem.

W przypadku ogniw fotowoltaicznych najważniejsze oddziaływania środowiskowe są związane ze zubożeniem zasobów. Recykling ogniw nie jest możliwy [11]. Istnieją próby opracowania opłacalnych ekonomicznie procesów odzyskiwania krzemu, wymienia

się np. kilka możliwości zastosowania proszku krzemowego ze zużytych ogniw fotowoltaicznych: jako surowca do produkcji nowych ogniw, jako dodatku stali stopowych i do produkcji ceramiki [12].

2.3. Biomasa

Energia biomasy jest energią słoneczną związaną dzięki procesom fotosyntezy. Z reguły wymienia się cztery metody zastosowania biomasy:

- bezpośrednie współspalanie,
- spalanie w cyrkulującym złożu fluidalnym,
- zgazowanie w cyrkulującym złożu fluidalnym,
- współspalanie gazu ze zgazowania biomasy.

Wykorzystywane rodzaje biomasy to m.in. drewno odpadowe, pozostałości z lasu i rolnictwa, ścinki i gałęzie, mięso i mączka kostna, osady ściekowe, nawóz ptasi.

Podstawowe korzyści zastosowania biomasy to zmniejszenie emisji dwutlenku węgla i zmniejszenie wykorzystania energii paliw nieodnawialnych. Mniejsza emisja CO₂ wynika z tego, że w czasie spalania lub zgazowania biomasy masa wyemitowanego dwutlenku węgla jest taka sama, jak zaabsorbowana w trakcie wzrostu. W okresie wzrostu emisja ma znak ujemny (absorpcja), a więc w zamkniętym cyklu nie ma wkładu netto CO₂ pochodzącego z wykorzystania biomasy. W literaturze wymienia się także inne zalety stosowania biomasy:

- tani surowiec – biomasa na ogół jest tańsza niż węgiel,
- niski koszt inwestycji,
- mniejsza ilość zanieczyszczeń (siarki i rtęci) od paliw kopalnych,
- korzystny wpływ na sektor rolnictwa.

Skład paliwa i udział procentowy biomasy jest istotny, ponieważ biomasa obniża takie parametry, jak sprawność instalacji i wartość opałową paliwa. Uprawy ukierunkowane na wytwarzanie roślin energetycznych mogą mieć także negatywny wpływ na bioróżnorodność, powodują erozję gleby, jak również duże wykorzystanie gruntów oraz wody. Pozostały negatywny wpływ na środowisko spowodowany jest przede wszystkim stosowaniem nawozów, pestycydów oraz transportem.

Jedną z najdokładniejszych analiz cyklu życia energii elektrycznej produkowanej w wyniku zgazowania biomasy (Biomass Gasification Combined Cycle) z 1997 r. [13] objęła następujące etapy:

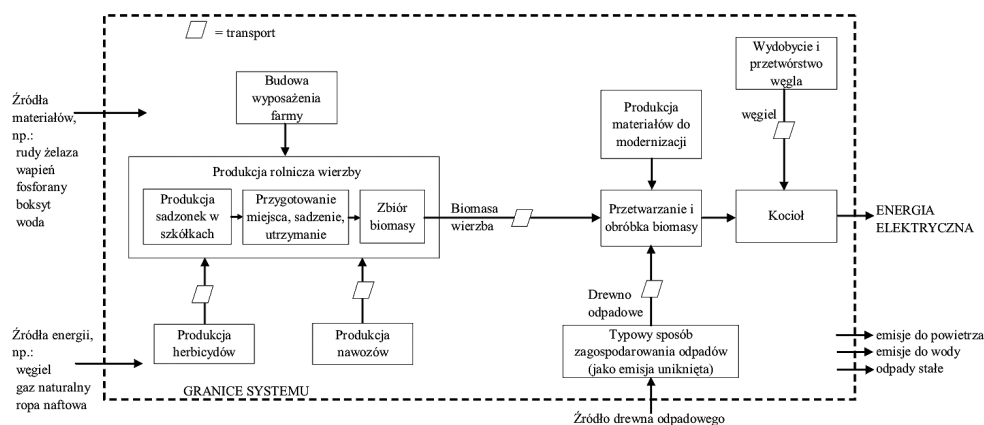
- pozyskanie surowców (m.in. do budowy oraz do produkcji paliw transportowych),
- budowę plantacji,
- budowę instalacji i wyposażenia transportowego,
- recykling i składowanie materiałów budowlanych, rozbiórkowych i innych odpadów,
- produkcję środków transportowych, nawozów, pestycydów,
- sadzenie, nawożenie, stosowanie pestycydów,
- przygotowanie biomasy i jej zbiór,
- transport do farmy,
- transport do instalacji,
- magazynowanie w elektrowni.

Inwentaryzacja emisji i zużycia energii została przeprowadzona za pomocą metody PCA oraz IOA na podstawie danych z bazy EIOLCA (przeprowadzono szacowanie danych

fizycznych na podstawie danych monetarnych uśrednionych dla całego sektora). Metodą IOA szacowano oddziaływanie związane np. z rekultywacją terenu i rozbiórką instalacji.

Analiza produkcji energii elektrycznej w wyniku współspalania pyłu węglowego i wierzby [14] wykazała, że dzięki zastosowaniu 10% biomasy potencjał cieplarniany GWP spada o 7–10% w stosunku do spalania węgla, emisja SO_2 jest mniejsza o 9,5%, może też nastąpić znacząca redukcja tlenków azotu (zależy to od kilku czynników). Analizę przeprowadzono dla dwóch scenariuszy współspalania, w obydwu założono udział 10% biomasy: w pierwszym 5% wierzby oraz 5% odpadów drewna, a w drugim 10% wierzby. W analizie założono, że biomasa może pochodzić z produktów odpadowych z rolnictwa lub lasu albo z przeznaczonych specjalnie na ten cel upraw.

Granice systemu przedstawione na rys. 4 uwzględniały następujące etapy: produkcję biomasy z wierzby, wydobycie i przetwarzanie węgla, transport węgla i biomasy, wytwarzanie wyposażenia uzupełniającego (modernizację) do współspalania i uniknięte działania związane z zagospodarowaniem pozostałości drzewnych na wysypisku. Założono, że modernizacja instalacji do spalania węgla wymagana do współspalania biomasy obejmuje: młyny młotowe, silos do przechowywania, przenośnik kubełkowy pionowy, lej paliwa, płyty betonowe. Dla scenariusza bazowego (bez biomasy) instalacja nie ma modernizacji.



Rys. 4. Schemat cyklu życia wytwarzania energii elektrycznej w wyniku współspalania wierzby i węgla (źródło: opracowanie własne na podstawie [14])

Fig. 4. Life cycle of biomass cofiring system

W wyniku analizy stwierdzono, że:

- biomasa zawiera mniej siarki, więc w wyniku jej współspalania powstaje mniej SO_2 ,
- zmiana w emisjach związana jest ze składem biomasy, a redukcja emisji NO_x zależy również od konfiguracji i działania kotła,
- dzięki współspalaniu biomasy następuje znaczna redukcja emisji rtęci (8,4%),
- następuje redukcja zużycia paliw nieodnawialnych.

Stwierdzono ponadto, że straty podczas transportu odgrywają istotną rolę w konsumpcji energii. Redukcja emisji w wyniku stosowania biomasy jest porównywalna z innymi

odnawialnymi źródłami energii, ale jej zaletą jest to, że w przeciwieństwie do nich zapewnia ciągłą, a nie okresową pracę.

Inne aspekty istotne dla wyników, a obciążone dużą niepewnością, to: wielkość zbiorów, ilość paliw zużywanych na polach, ilość emitowanych tlenków azotu (emisja termiczna), ilość stosowanych nawozów, pestycydów itp. Dane te wymagają analizy wrażliwości. Elementem często nieuwzględnianym w analizie, a mającym znaczenie dla wymaganej ilości nawozów oraz dla ilości pochłanianego dwutlenku węgla, jest poprzednie przeznaczenie terenu. Zużycie wody w cyklu życia zależy od założenia dotyczącego jej pochodzenia – jest ono znacznie mniejsze, jeśli w analizie założono, że wystarczająca do uprawy ilość wody pochodzi z opadów atmosferycznych i niepotrzebne jest dodatkowe nawadnianie, a zużycie wody następuje jedynie w samej instalacji i w pozostałych procesach uwzględnionych w cyklu życia.

Analiza wykorzystania biomasy do celów produkcji energii elektrycznej w projekcie ECLIPSE [15] obejmowała następujące etapy cyklu życia:

- wstępne przygotowanie paliw,
- produkcję niezbędnych substancji chemicznych do przygotowania paliw i produkcji biomasy i innych paliw,
- produkcję materiałów budowlanych do budowy elektrowni,
- przygotowanie substancji chemicznych niezbędnych dla działania elektrowni,
- koniec życia – zagospodarowanie materiałów odpadowych, recykling.

Etap produkcji paliw obejmował węgiel i biomasę. W przypadku węgla wzięto pod uwagę wydobycie, przygotowanie, przetwarzanie, składowanie, transport, natomiast w przypadku biomasy:

- dla drewna rozbiórkowego, gałęzi i ścinek, nawozu ptasiego – zbiórkę i transport,
- dla mięsa i mączki kostnej – produkcję i transport,
- dla osadów ściekowych – suszenie i transport.

Dane dotyczące sprawności instalacji oraz założenie dotyczące źródła biomasy i jej wstępnego przygotowania, takie jak ilość energii elektrycznej zużywanej do rozdrabniania, mają duży wpływ na wyniki. Założono, że wszystkie paliwa oprócz mączki kostnej są poddawane procesom rozdrabniania, a gałęzie, ścinki i nawóz ptasi muszą być dodatkowo suszone.

W etapie działania i utrzymania elektrowni uwzględniono pozyskanie i transport niezbędnych substancji zależnych od rodzaju technologii, w tym wapienia, materiału złoża, np. SiO_2 , wody, amoniaku, azotu, NaOH oraz wymianę części i ich transport. W projekcie analizowano cztery technologie zastosowania biomasy opisane w tabeli 1.

Inną technologią wykorzystującą energię biomasy jest skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej CHP z biomasy [16]. Może się ono odbywać na dwa sposoby – w wyniku spalania z cyklem pary lub zgazowania. W analizie cyklu życia systemu CHP występują następujące fazy:

- produkcja paliwa – dominujące oddziaływania w wyniku tej fazy to emisja dwutlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych (NMLZO),
- budowa (powoduje głównie zużycie rud metali i węgla kamiennego),
- działanie instalacji – powoduje przede wszystkim emisję CO_2 biogeniczną, emisję tlenków azotu, pyłów, tlenków siarki,
- rozbiórka – ma niewielki wpływ na środowisko.

Tabela 1

Technologie zastosowania biomasy

Technologie zastosowania biomasy	Współspalanie bezpośrednie	Spalanie w cyrkulującym złożu fluidalnym (CFBC)	Zgazowanie w cyrkulującym złożu fluidalnym (CFBG)	Zgazowanie i współspalanie
Opis	<p>Odbywa się w zmodyfikowanych kotłach do spalania pyłu węglowego.</p> <p>Wymaga obróbki wstępnej, tj. proszkowania, peletowania, mieszania, suszenia.</p> <p>Dwie instalacje oczyszczania gazów – odpyłania (ESP) oraz odsiarczania (FGD).</p> <p>W cyklu życia należy uwzględnić wydobycie, przetwarzanie, przygotowanie i transport węgla.</p>	<p>Cząstki paliwa są zawieszane w trakcie spalania podmuchem, dzięki czemu reakcje chemiczne i transfer ciepła zachodzą w efektywniejszy sposób.</p> <p>Stosowane paliwa – drewno z rozbiórki, gałęzie i śinki, osady ściekowe.</p>	<p>Zgazowanie zachodzi w temperaturze 850°C. Otrzymane paliwo (CO i H₂) jest odsiarczane (FGD) i odpylane (filtr), a usuwane są: NH₃, HCl i większość metali ciężkich.</p> <p>Z paliwa gazowego w turbinie parowej i gazowej produkowana jest energia elektryczna.</p> <p>Stosowane rodzaje biomasy: drewno rozbiórkowe, śinki i gałęzie, mięso i mączka kostna, osady ściekowe.</p>	<p>Zgazowanie atmosferyczne w cyrkulującym złożu fluidalnym w temperaturze 850°C.</p> <p>Gaz przechodzi przez cyklon, wymiennik ciepła i filtr ceramiczny. Schładzany jest do 240°C (produkcja pary), a następnie współspalany z węglem.</p> <p>Oczyszczanie gazów odłotowych: ESP i FGD.</p> <p>Stosowane paliwa: drewno rozbiórkowe, śinki i gałęzie, mięso i mączka kostna, osady ściekowe.</p>
Etapy cyklu życia o największym oddziaływaniu	<p>wydobycie i transport węgla (emisja metanu, popiołu, NMLZO, NO_x, SO_x, zużycie paliw kopalnych)</p> <p>działanie instalacji (emisje kopalnego i biogenicznego CO₂, SO₂, NO_x)</p>	<p>produkcja i zbieranie biomasy (emisja NMLZO, CO₂, pyłu, metanu, zużycie ropy)</p> <p>wstępne przygotowanie biomasy (rozdrobienie i suszenie) – emisja CO₂, metanu, pyłu, SO_x, zużycie węgla kamiennego i brunatnego (oraz uranu zależnie od miksu energetycznego)</p> <p>działanie (emisja biogenicznego CO₂ i NO_x)</p>	<p>produkcja i zbieranie biomasy – emisja NO_x, NMLZO, CO₂ z paliw kopalnych, pyłu, metanu; następuje zużycie ropy</p> <p>obróbka wstępna biomasy – emisja CO₂ z paliw kopalnych, metanu, pyłu, SO_x, zużycie paliw kopalnych do procesów suszenia i rozdrabniania (jeśli są niezbędne)</p> <p>eksploatacja instalacji – emisja biogeniczna CO₂, duża emisja SO_x</p>	<p>wydobycie i transport węgla – emisje metanu, pyłu, NMLZO, duża emisja NO_x i SO_x, zużycie paliw kopalnych</p> <p>działanie instalacji – emisja biogenicznego i kopalnego CO₂, duża emisja NO_x i SO_x</p>

Bardzo istotna dla wyników analizy jest całkowita sprawność instalacji. Sprawność rzeczywista w systemach CHP jest niższa niż teoretyczna ze względu na sezonowe zmiany zapotrzebowania na ciepło. W przypadku skojarzonego wytwarzania ciepła i elektryczności należy dokonać wyboru metody alokacji. W ramach projektu ECLIPSE zalecana jest alokacja zgodna z egzergią, która w najlepszy sposób oddaje użyteczność, ale jej stosowanie sprawia, że wyniki są wrażliwe na przyjętą temperaturę otoczenia.

2.4. Energia wodna

Energia wodna jest oceniana w bardzo różny sposób – dla jednych jest najbardziej proekologicznym sposobem uzyskiwania energii, dla innych – jednym z najbardziej szkodliwych odnawialnych źródeł energii.

Analiza cyklu życia elektrowni wodnych [4, 17] powinna brać pod uwagę następujące cechy:

- rodzaj instalacji – przepływowe lub zbiornikowe,
- skalę instalacji – duży zbiornik wymaga większej ilości materiałów budowlanych, większego obszaru, tam, wałów,
- rodzaj materiału do budowy – skała, beton, cement.

Powinno się również uwzględnić następujące czynniki:

- zużycie ziemi,
- straty w wyniku parowania, przecieków,
- sedymentację,
- emisję gazów cieplarnianych z gnijącej roślinności po zalaniu,
- warunki temperaturowe – w ciepłym klimacie, np. tropikalnym, powstaje większa ilość gazów cieplarnianych,
- lokalizację – jeśli na zalanym obszarze był las, większa będzie ilość gnijącej roślinności; większe wykorzystanie gruntów rolnych w przypadku zalewania ziem uprawnych; lokalizacja decyduje również o wpływie na ekosystem, siedliska itp.,
- zmiany geologiczne.

3. Magazynowanie energii odnawialnej

Odnawialne źródła energii często są łączone z systemami magazynowania energii do optymalizacji ich wykorzystania, dzięki możliwości dostosowania podaży energii do zmiennego zapotrzebowania.

W granicach systemu powinna wtedy zostać uwzględniona konstrukcja urządzenia do magazynowania energii i niezbędnego wyposażenia do transmisji energii, jak również etapy eksploatacji i utrzymania (O&M) oraz demontażu systemu. Ocena instalacji magazynowania energii może być wykonywana oddzielnie lub obejmować etap wytwarzania energii elektrycznej. Wskaźnikiem efektywności magazynowania energii jest ER oraz ER_{net} [18]. Innym rozwiązaniem jest analiza sprzężonych systemów – na przykład ze względu na zmienność wytwarzania energii przez turbiny wiatrowe uważa się czasami, że dla celów porównawczych z innymi systemami energetycznymi należałoby rozważać system sprzężony, np. turbinę wiatrową i gazową.

4. Dynamiczne LCA jako metoda przyszłości

Ze względu na szybki postęp technologiczny odnawialnych źródeł energii zaleca się stosowanie dynamicznej analizy cyklu życia. Dynamiczne podejście w LCA polega na uwzględnieniu redukcji wpływu środowiskowego dzięki zwiększeniu sprawności, długości życia, zaawansowaniu procesów produkcyjnych, ulepszeniu procesów produkcji ciepła, energii i transportu wykorzystywanych do procesu produkcyjnego.

Taka przykładowa analiza została przeprowadzona dla następujących rodzajów energii: fotowoltaiki, geotermii, energii wodoru, biomasy, wiatru, słonecznej termalnej [19], i uwzględniała przewidywane zmiany, które nastąpią w przyszłości do 2030 r., np.:

- zmianę miks paliw używanych do produkcji energii elektrycznej – założono, że w przyszłości struktura wytwarzania energii będzie zgodna ze scenariuszem zrównoważonego rozwoju do 2050 r. opracowanym przez EPA, a więc znaczna ilość energii będzie pochodziła z OZE; scenariusz ten zakłada zmniejszenie emisji CO₂ o 80% do 2050 r.,
- redukcję zapotrzebowania energii w procesie elektrolizy o 7%,
- recykling aluminium w 2030 r. na poziomie 90% w porównaniu z 2010 r. na poziomie 85% oraz recykling stali w 2030 roku – 75% (obecny – 43%),
- zmiany w procesach technologicznych – uzyskano je przez ekstrapolację danych zawartych w dokumentach BAT.

LCA przeprowadzone w taki sposób nie jest przewidywaniem wpływu, ale szacowaniem wielkości redukcji oddziaływania.

Dynamiczne LCA zostało uwzględnione także w ramach projektu NEEDS [20] (New Energy Externalities Developments for Sustainability) realizowanego w ramach 6 Programu Ramowego UE.

5. Podsumowanie

1. Analiza cyklu życia pokazuje, że technologie OZE nie są wolne od oddziaływania na środowisko. Jej wyniki cechuje bardzo duża rozbieżność, co jest spowodowane silnym wpływem wielu specyficznych parametrów konkretnej instalacji, jak również założeń i stosowanej metodologii analizy. Czynniki mające wpływ na rezultaty LCA odnawialnych źródeł energii to między innymi: uwarunkowania klimatyczne, położenie geograficzne, uwarunkowania lokalne instalacji (np. nasłonecznienia), sytuacja topograficzna, dostępność i źródło materiałów, technologia produkcji, typ urządzenia, zastosowane materiały, stopień recyklingu, lokalna infrastruktura, droga transportu, miks energetyczny, granice systemu.
2. Do obszarów problemowych przy analizach LCA odnawialnych źródeł energii należy zaliczyć m.in. problemy z oszacowaniem ilości materiałów zużytych do konstrukcji urządzeń i instalacji, wybór sposobu alokacji wielkości zużycia energii i emitowanych zanieczyszczeń w analizowanych procesach, założenie sprawności instalacji na poziomie zbliżonym do rzeczywistego jej wykorzystania. W związku z tym wskazane wydaje się uwzględnienie tych elementów w analizie wrażliwości.
3. Analiza porównawcza różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej wymaga ujednolicenia metodyki LCA, przede wszystkim odnośnie do stosowania jednakowych

- granic systemów, obejmujących wszystkie etapy życia istotnie oddziałujące na środowisko. Mimo takiego podejścia należy pamiętać, że wyniki LCA zawsze odnoszą się do konkretnego analizowanego przypadku, a ich uogólnianie powinno być zawsze przeprowadzane z dużą dozą ostrożności. Jest to przede wszystkim istotne w przypadku OZE – z powodu wpływu na wyniki tak wielu czynników nie jest możliwa jednoznaczna ocena i uszeregowanie technologii uzyskiwania energii ze źródeł odnawialnych.
4. W przypadku OZE, ze względu na szybki postęp technologiczny i istotny wpływ różnych parametrów na wyniki, bardzo owocne może być stosowanie dynamicznego LCA, które uwzględnia zmiany technologiczne przewidywane w przyszłości, m.in. zastąpienie obecnego miksu energetycznego opartego na energii z paliw kopalnych miksem opartym w znacznym stopniu na energii odnawialnej oraz udoskonalenie ważnych procesów wytwórczych, np. stali i betonu. Zabieg taki jest wyjątkowo cenny dla analiz długoterminowych wykorzystywanych w procesie decyzyjnym, a prace tego typu w przyszłości będą coraz częstsze.

Artykuł opracowany w ramach projektu „Zeroemisyjna gospodarka energią w warunkach zrównoważonego rozwoju Polski do 2050” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Literatura

- [1] Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2008.
- [2] Frankl P., *Life Cycle Assessment of Renewables: Present Issues, Future Outlook and Implications for the Calculation of External Costs, Externalities and Energy Policy*, The Life Cycle Analysis Approach Workshop Proceedings, Paris, 15–16 November 2001, 141-160.
- [3] Lenzen M., Munksgaard J., *Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines – review and applications*, Renewable Energy 26 (2002), 339-362.
- [4] Mills S.J., *Coal full life cycle analysis*, IEA Clean Coal Centre, 2005 CCC/99.
- [5] Chataignere A., Le Boulch D., *Wind Turbine (WT) systems*, ECLIPSE, 2003, www.eclipse-eu.org (dostęp 20.07.2009).
- [6] Frankl P., *Synthesis Report*, ECLIPSE, 2004, Deliverable 4.6, www.eclipse-eu.org (dostęp 20.07.2009).
- [7] Schleisner L., *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities*, Renewable Energy 20 (2000), 279-288.
- [8] Jungbluth N., Bauer C., Dones R., Frischknecht R., *Life-Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power*, Int. J. LCA 10 (1), 24-34(2005).
- [9] *Krzem dla ogniw słonecznych*, Chemik, nr 2, luty 2002, dział: Nowiny technologiczne, s. 53.
- [10] Frankl P., Corrado A., Lombardelli S., *Photovoltaic (PV) Systems*, ECLIPSE, 2004, www.eclipse-eu.org (dostęp 20.07.2009).

- [11] Bergson J., Lave L., *A Life Cycle Analysis of Electricity Generation Technologies: Health and Environmental Implications of Alternative Fuels and Technologies*, Carnegie Mellon Electricity Industry Centre, 2002.
- [12] Radziemska E., Ostrowski P., *Zagospodarowanie proszku krzemowego odzyskanego w procesach produkcji i recyklingu uszkodzonych ogniw fotowoltaicznych*, Proceedings of ECOpole, Vol. 3, No. 1, 2009.
- [13] Mann M.K., Spath P.L., *Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System*, National Renewable Energy Laboratory, 1997, NREL/TP-430-23076.
- [14] Cuperus M.A.T., *Biomass systems. Final Report*, ECLIPSE, 2003, www.eclipse-eu.org (dostęp 20.07.2009).
- [15] Heller M.C., Keoleian G.A., Mann M.K., Volk T.A., *Life Cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass*, Renewable Energy 29 (2004), 1023-1042.
- [16] Setterwall C. et al., *Bio-fuelled Combined Heat and power Systems. Final Report*, ECLIPSE, 2003, www.eclipse-eu.org (dostęp 20.07.2009).
- [17] Varum, Bhat J., Prakash R., *LCA of renewable energy for electricity generation systems – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009), 1067-1073.
- [18] Denholm P., Kulcinski G.L., *Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems*, Energy Conversion and Management 45 (2004), 2153–2172.
- [19] Pehnt M., *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies*, Renewable Energy 31 (2006), 55-71.
- [20] Frischknecht R., Krewitt W., Tuchschnid M., *Meeting the NEEDS... of European environmental sustainability assessment*, [in:] *Proceedings*, 14th SETAC LCA Case Studies Symposium, Göteborg, Sweden, 2007.