



DOI: 10.5604/20830157.1159333

## SYSTEMY FOTOWOLTAICZNE W BUDYNKACH – MODEL PRACY W WARUNKACH KLIMATYCZNYCH LUBLINA A ASPEKTY ŚRODOWISKOWE

**Agnieszka Żelazna**

Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Zakład Zrównoważonego Rozwoju

**Streszczenie.** Z uwagi na rosnącą konsumpcję oraz wyczerpywanie złóż kopalin jednym z istotnych problemów jest zaopatrzenie w energię. W związku z tym odnawialne źródła energii, takie jak energia słoneczna, stają się coraz bardziej popularne, jednak wprowadzaniu na rynek nowych technologii powinna zawsze towarzyszyć analiza ich oddziaływania na środowisko. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki porównania emisji dwutlenku węgla na bazie metodologii zarządzania środowiskowego Life Cycle Assessment (Ocena Cyklu Życia) wybranych systemów fotowoltaicznych. Symulacja pracy instalacji obejmowała uwzględnienie lokalnych warunków klimatycznych. W porównaniu ze wskaźnikami emisji dla konwencjonalnych źródeł energii, wymienione technologie wykazują znaczny spadek wskaźników emisji gazów cieplarnianych w perspektywie cyklu życia i dlatego też mogą być stosowane w celu realizacji uregulowań międzynarodowych w tym zakresie.

**Słowa kluczowe:** ślad węglowy, energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna, ocena cyklu życia, zarządzanie środowiskowe, wskaźnik Global Warming Potential

## ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ В БУДІВЛЯХ - МОДЕЛЬ РОБОТИ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЛЮБЛІНА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

**Анотація.** У зв'язку зі збільшенням використання і виснаженням родовищ корисних копалин, енергопостачання є однією з головних проблем. Таким чином, відновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія, стають все більш поширеними, але впровадження нових технологій завжди має супроводжуватися аналізом їх впливу на навколишнє середовище. В даній статті наведено результати порівняння викидів діоксиду вуглецю на основі методології екологічного менеджменту Life Cycle Assessment (Оцінка Життєвого Циклу), обраних фотоелектричних систем. В роботі місцевий клімат був браний під увагу. У порівнянні з викидами для звичайних джерел енергії, ці технології демонструють значне зниження рівня викидів та парникових газів в перспективі Життєвого Циклу, і тому можуть бути використані для здійснення міжнародних нормативних документів у цій галузі.

**Ключові слова:** вуглецевий слід, сонячна енергія, фотоелектрична конверсія, оцінка життєвого циклу, управління навколишнім середовищем, показник глобального потепління

## PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN BUILDINGS – MODEL OF WORK IN LUBLIN CLIMATE CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

**Abstract.** Due to the increasing consumption and depletion of fossil fuels' resources, one of the nowadays major problems is energy supply. Consequently, renewable energy sources, such as solar energy, are becoming more and more popular. However, introduction of new technologies should always be accompanied by the analysis of their impact on the environment. This article presents the results of the comparison of carbon dioxide emissions from selected photovoltaic systems on the basis of the environmental management method Life Cycle Assessment. Model of the installation work included local climate conditions. In comparison with the emission indicators of conventional energy sources, solar technologies bring a significant decrease of greenhouse gas emissions throughout the life cycle, and therefore can be used for the implementation of the international regulations in this area.

**Keywords:** carbon footprint, solar energy, photovoltaic, life cycle assessment, environmental management, Global Warming Potential

### Wprowadzenie

Pojęcie zrównoważonego rozwoju odnosi się do równowagi pomiędzy trzema obszarami natury ekologicznej, ekonomicznej i społecznej. W dobie społeczeństwa konsumpcyjnego utrzymanie tej równowagi nie jest do kwestii łatwą, dlatego też konieczne jest wprowadzenie środków prawnych w celu wyznaczenia pożądanych kierunków rozwoju społeczeństw. Obecnie idea zrównoważonego rozwoju jest traktowana jako priorytet w większości aktów prawnych na poziomie zarówno Unii Europejskiej, jak też poszczególnych krajów. W działalności gospodarczej, w tym dla producentów energii, zrównoważony rozwój oznacza uwzględnienie aspektów ekologicznych w określaniu kierunków rozwoju, zgodność z normami środowiskowymi i dostosowanie potrzeb rozwojowych do lokalnych warunków [1, 12].

Znaczenie branży energetycznej w realizacji zasady zrównoważonego rozwoju jest istotne z uwagi na fakt, że w ciągu ostatnich 25 lat światowe zapotrzebowanie energii pierwotnej wzrosło o 63%, podczas gdy liczba ludności wzrosła o 45% [16]. Z perspektywy minionego stulecia, zużycie paliw wzrosło o 3% rocznie. Biorąc pod uwagę prognozy, zużycie to będzie stale wzrastać, co pociąga za sobą niebagatelne skutki zarówno społeczne, jak też ekonomiczne i środowiskowe.

Proponowane rozwiązania dla problemu przyszłości branży energetycznej skłaniają do inwestowania w nowe, ekologiczne

### Введення

Поняття зрівноваженого розвитку відноситься до балансу між трьома областями природи: екологічними, економічними та соціальними. В епоху консумпційного суспільства підтримка цього балансу є не легким завданням, тому необхідно вжити законодавчих заходів для визначення необхідного напрямку розвитку суспільства. Сьогодні ідея зрівноваженого розвитку стала пріоритетом в більшості правових актах, як на рівні Європейського Союзу, так і окремих країн. У господарчій діяльності, в промисловості, для producentів енергії, зрівноважений розвиток означає врахування екологічних аспектів у визначенні напрямку розвитку, дотримання екологічних норм та потреб розвитку для місцевих умов [1, 12].

Важливість енергетичного сектору в реалізації принципу зрівноваженого розвитку має важливе значення у зв'язку з тим, що за останні 25 років світовий попит на первинну енергію зріс на 63%, в той час як населення зросло на 45% [16]. З точки зору минулого століття, витрата палива збільшилася на 3% в рік. Враховуючи прогнози, то споживання буде продовжувати рости, що тягне за собою значні наслідки соціальні, а також економічні і екологічні.

Запропоновані рішення для розв'язання проблеми майбутнього в енергетичній галузі, заохочують інвестувати

technologie, takie jak odnawialnych źródeł energii (OZE). Polska, jako członek Organizacji Narodów Zjednoczonych i Unii Europejskiej, jest zobowiązana do promowania OZE poprzez podpisanie Ramowej Konwencji w sprawie zmian klimatu i protokołu z Kioto. Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, podejmująca kwestię zagrożeń powodowanych przez globalne ocieplenie, przyjęto podczas Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro w czerwcu 1992 r. Jej kontynuacją był Protokół z Kioto z 1997 r. Państwa biorące udział w jego podpisaniu zobowiązały się do redukcji emisji CO<sub>2</sub> o wynegocjowane wielkości, wynoszące minimum 5% w stosunku do stanu wyjściowego.

Ponadto zatwierdzony w końcu 2008 roku przez Parlament Europejski pakiet klimatyczny 3x20 zakłada zmniejszenie produkcji CO<sub>2</sub>, zwiększenia efektywności energetycznej oraz wzrost udziału w rynku odnawialnych źródeł energii [1, 12].

Obecnie większość energii wytwarzanej na polskim rynku opiera się na węglu [13]. Inicjatywa wprowadzenia technologii czystej energii powinna być poprzedzona przez stosowne analizy i badania, które wskażą na prawidłowe decyzje o rodzaju odnawialnych źródeł energii i skuteczne sposoby ich wykorzystania. Technika zarządzania środowiskowego umożliwiającą całościową analizę produktu bądź systemu jest Ocena Cyklu Życia (Life Cycle Assessment, LCA).

Jedną z popularnych metod oceny wpływu cyklu życia jest technika obliczania emisji gazów cieplarnianych, wyrażonej jako kgCO<sub>2eq</sub> [17]. Celem niniejszej pracy jest określenie emisji ekwiwalentny ditlenku węgla dla dwóch popularnych technologii fotowoltaicznych z wykorzystaniem Oceny Cyklu Życia poprzez określenie potencjału globalnego ocieplenia w perspektywie stu lat (Metoda GWP100a).

## 1. Środowiskowe aspekty pracy instalacji słonecznych

W literaturze naukowej ostatniej dekady pojawiły się artykuły dotyczące oceny cyklu życia energii pochodzącej z odnawialnych źródeł. Większość analiz dotyczy bilansu ekologicznego systemów ciepłej wody i systemów fotowoltaicznych w oparciu o przykłady urządzeń pracujących w Europie Południowej lub uwzględnia ocenę cyklu życia na etapie produkcji komponentów systemu.

Ardente [3] zastosował metodologię Oceny Cyklu Życia do analizy emisji ditlenku węgla związanej z fazą produkcji kolektora słonecznego (2,13 m<sup>2</sup> powierzchni efektywnej). Autor oszacował wykorzystanie energii pierwotnej na etapie produkcji modułu jako 11,5 GJ i emisję ditlenku węgla jako 721 kgCO<sub>2eq</sub>. Większość energii pierwotnej jest związane z fazą wydobywania surowców. W podsumowaniu autor podkreślił, że bezpośrednie zużycie energii jest mniej istotne, niż zużycie pośrednie.

Kalogirou [9, 10] zastosował Ocenę Cyklu Życia do analizy wpływu na środowisko płaskich kolektorów słonecznych z punktu widzenia zużycia energii pierwotnej. Pierwszy system działa jako zintegrowany z zasobnikiem ciepłej wody użytkowej, wykorzystanie energii pierwotnej do produkcji oszacowano jako 2,7 GJ. Dla standardowego systemu z dwoma mediami (glikol polipropylenowy dla kolektorów i ciepła woda w instalacji) autor obliczył zużycie energii pierwotnej jako 3,5 GJ.

Battisi i Corrado [4] poddali analizie system kolektora słonecznego termicznego zintegrowanego z zasobnikiem. Wykorzystanie energii pierwotnej dla produkcji, dostawy i końcowego zagospodarowania badanego systemu zostało obliczone jako 3,1 GJ, a emisja gazów cieplarnianych jako 219,4 kgCO<sub>2eq</sub>. Większość wskaźników jest związana z fazą produkcji (97,8%). Ze względu na szczególną budowę systemu (kolektor pojemnościowy jako magazyn ciepła), który nie wymaga żadnych dodatkowych środków do pracy (brak konieczności pompowania), fazy operacyjna cyklu została pominięta. Należy wspomnieć, że tego rodzaju system nie może pracować

w nowi ekologicznie czyste technologie, takie jak odnawialne źródła energii (WDE). Polska, jako członek Organizacji Ob'ednanych Naцій та Європейського союзу зобов'язана сприяти WDE, підписавши Конвенцію з питань зміни клімату і Киотський протокол. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, яка підіймає питання ризику, пов'язаного з глобальним потеплінням, прийнята на Саміті Землі в Ріо-де-Жанейро в червні 1992 році. Її продовженням був Киотський протокол в 1997 році, країни, що брали участь у підписанні зобов'язалися скоротити викиди CO<sub>2</sub> до договірних розмірів мінімум 5% щодо вихідного рівня.

Крім того, затверджено наприкінці 2008 року Європейським парламентом Кліматичний Пакет 3x20 націлений на скорочення виробництва CO<sub>2</sub>, підвищення енергоефективності та збільшення частки ринку поновлюваних джерел енергії [1, 12].

В даний час велика частина енергії, що виробляється на польському ринку є на основі вугілля [13]. Ініціативи впровадження екологічно чистих енергетичних технологій мають передувати відповідні дослідження, які будуть вказувати правильні рішення для типу відновлюваних джерел енергії та ефективних способів їх використання. Техніка управління навколишнім середовищем, що дозволяє проводити комплексний аналіз продукту або системи є Оцінка Життєвого Циклу (Life Cycle Assessment, LCA).

Одним з популярних методів Оцінки Життєвого Циклу є техніка розрахунку викидів парникових газів, виражена кгCO<sub>2eq</sub> [17]. Метою даної статті є визначення викидів у еквіваленті діоксиду вуглецю для двох популярних фотоелектричних технологій з використанням Оцінки Життєвого Циклу, ідентифікації потенціалу глобального потепління в перспективі через сто років (метод GWP100a).

## 1. Екологічні аспекти роботи сонячних установок

У науковій літературі останнього десятиліття, з'явилися статті про Оцінку Життєвого Циклу енергії з відновлюваних джерел. Більша частина аналізу стосується екологічного балансу системи гарячого водопостачання і фотоелектричних систем на основі пристроїв, що працюють в Південній Європі, і включає в себе оцінку стадії життєвого циклу виробничих компонентів.

Ardente [3] застосував методіку Оцінки Життєвого Циклу для аналізу викидів вуглекислого газу, пов'язаних з етапом виробництва сонячного колектора (2,13 m<sup>2</sup> ефективною поверхнею). Автор оцінює використання первинної енергії на стадії виробничого модуля як 11,5 ГДж і викидів діоксиду вуглецю, як 721 кгCO<sub>2eq</sub>. Більшість первинної енергії пов'язана з видобутком сировини. Підсумовуючи, автор зазначив, що пряме використання енергії є менш важливим, ніж проміжне споживання.

Kalogirou [9, 10] застосував оцінку Життєвого Циклу для аналізу впливу сонячних батарей на довколишнє середовище з точки зору споживання первинної енергії. Перша система співпрацює з системою для підігріву води, використання первинної енергії щодо продукції оцінюється в 2,7 ГДж. Для стандартної системи з двома середовищами (поліпропілен гліколь для колекторів і гаряча вода в інсталяції) автор розрахував споживання первинної енергії як 3,5 ГДж.

Battisi i Corrado [4] проаналізували систему сонячного колектора термічно інтегрованого з енергозбереженням. Споживання первинної енергії для виробництва, постачання і кінцевого управління тестованою системою розраховано як 3,1 ГДж, а викиди парникових газів, як 219,4 кгCO<sub>2eq</sub>. Більшість показників пов'язані з виробничою фазою (97,8%). Завдяки спеціальній конструкції системи (колектор ємності, служить в якості сховища тепла), яка не вимагає жодних додаткових ресурсів для роботи (немає необхідності для перекачування) експлуатаційна фаза циклу була опущена.

w warunkach polskiego klimatu ze względu na możliwość zamrożenia w sezonie zimowym.

We wszystkich przypadkach wyniki badań wskazują na niskie w porównaniu do konwencjonalnych źródeł emisje dwutlenku węgla z systemów solarnych do przygotowania ciepłej wody użytkowej. Ponadto czas zwrotu dla emisji z fazy produkcji jest krótszy, niż całkowity okres cyklu życia.

W przypadku systemów fotowoltaicznych wyniki Oceny Cyklu Życia fazy ich produkcji dla różnych typów paneli można znaleźć w kilku pozycjach literatury [2, 6, 7]. Prace badawcze wymienione powyżej przedstawiają wyniki ocen za pomocą różnych technik, na przykład emisje metali ciężkich, gazów toksycznych i gazów cieplarnianych.

W artykule Fthenkalis [8] emisje gazów cieplarnianych zostały obliczone w  $\text{gCO}_{2\text{eq}}$  przypadających na 1 kWh (jednostka funkcjonalna) dla warunków nasłonecznienia Europy południowej i dla kilku typów modułów fotowoltaicznych oraz pomocniczych elementów systemu. Przedział wartości emisji rozpoczął się od około 20  $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$  dla modułów CdTe i przy wykorzystaniu danych dotyczących produkcji energii elektrycznej z bazy danych Ecoinvent i kończył na wartości 55  $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$  dla modułów krzemowych monokrystalicznych i szacunkach emisji z produkcji elektryczności opartych na bazie danych Franklina.

We wszystkich przypadkach wskaźniki obliczone przez autorów oszacowano jako przynoszące realne korzyści dla środowiska poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych, osiągającą poziom 89-98%.

## 2. Metoda badawcza

Metodą badawczą niniejszej pracy jest środowiskowa Ocena Cyklu Życia. Metoda ta jest oparta na ocenie zużycia energii i materiałów oraz produkcji zanieczyszczeń i odpadów, które są związane z całym okresem życia danego produktu. Schemat techniczny LCA obejmuje następujące kroki [11, 15]:

1. definicja celu i zakresu analizy,
2. inwentaryzacja zbioru danych,
3. ocena wpływu cyklu życia,
4. interpretacja.

LCA jest traktowana jako analiza od kołyski do grobu, obejmuje zatem cały cykl istnienia produktu, w szczególności składa się z następujących elementów:

- identyfikacja i kwantyfikacja zanieczyszczeń wprowadzanych do środowiska, zużywanych materiałów i energii,
- ocena możliwych skutków wyżej wymienionych,
- wskazanie ewentualnych ulepszeń mających na celu ograniczenie tego wpływu [11].

Okres cyklu życia powinien obejmować preprodukcję (wydobycie surowców) oraz etapy produkcji, użytkowania i ostatecznego zagospodarowania.

Metodyka Oceny Cyklu Życia jest często stosowana jako element umożliwiający planowanie strategiczne i prognozowanie długofalowych skutków środowiskowych przedsięwzięć. Wyniki ocen usprawniają procesy decyzyjne z różnych dziedzin gospodarki. Z uwagi na uwzględnianie pełnego cyklu życia w analizie, wyniki Oceny Cyklu Życia mogą być przydatne w procesach decyzyjnych mających na celu minimalizację negatywnego wpływu wyrobów i usług na środowisko naturalne.

### 2.1. Definicja celu i zakresu

Celem analizy była ocena emisji gazów cieplarnianych związanej z produkcją energii elektrycznej przez systemy fotowoltaiczne wykorzystujące panele z krzemu mono i polikrystalicznego pracujące w warunkach klimatycznych Lublina (Polska południowo-wschodnia).

Śлід зазначити, що така система не може працювати в польських кліматичних умовах через можливість замерзання в зимовий період.

У всіх випадках, низькі результати досліджень в порівнянні зі звичайними джерелами викиду діоксиду вуглецю з сонячних систем для приготування гарячої води. Крім того, час відновлення для випромінювання продуктивної фази коротший, ніж загальний період життєвого циклу.

У випадку фотоелектричних систем Оцінка Життєвого Циклу, їх фази виробництва для різних типів панелей можна прочитати в декількох джерелах [2, 6, 7]. Науково-дослідні роботи, перераховані вище, являють собою результати оцінок з використанням різних методів, таких, як викиди важких металів, токсичних газів і парникових газів.

В статті Фтенакіс [8], викиди парникових газів були розраховані  $\text{gCO}_{2\text{eq}}$  в 1 кВт\*год (функціональна одиниця) для кількості сонячного світла в південній Європі для декількох типів фотоелектричних модулів і допоміжних компонентів. Діапазон значень викидів розпочинається з 20  $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$  для CdTe модулів і з використанням даних про виробництво електроенергії з Ecoinvent і закінчується на значенні 55  $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$  для монокристалічних кремнієвих модулів і оцінок викидів від виробництва електроенергії на основі бази даних Франкліна.

У всіх випадках, співвідношення розраховані авторами оцінюються, як такі, що приносять користь для навколишнього середовища за рахунок скорочення викидів парникових газів, досягнувши рівня 89-98%.

## 2. Методи дослідження

Методом дослідження даної роботи є Оцінка Циклу Життя навколишнього середовища. Цей метод опирається на оцінці споживання енергії і матеріалів, та утворенні забруднюючих речовин і відходів, які пов'язані з цілим періодом життя даного продукту. Технічна схема LCA включає наступні кроки [11, 15]:

1. визначення мети та сфери аналізу,
2. інвентаризація збору даних,
3. оцінка впливу життєвого циклу,
4. інтерпретація.

LCA розглядається, як аналіз від народження до смерті, охоплює цілий період існування продукту, складається з таких компонентів:

- ідентифікація та кількісне вимірювання шкідливих речовин, які потрапили в навколишнє середовище, витрачених матеріалів та енергії,
- оцінка можливих наслідків вище перерахованих,
- зазначення можливих поліпшень, спрямованих на зниження впливу [11].

Життєвий цикл повинен включати підготовку виробництва (видобуток сировини) та етапи виробництва, використання і остаточне видалення.

Методологія Оцінки Життєвого Циклу часто використовується, як засіб для стратегічного планування і прогнозування довгострокових екологічних наслідків проєктів. Результати оцінок оптимізують процеси прийняття рішень в різних секторах економіки. Беручи до уваги повний життєвий цикл в аналізі, результати можуть бути корисними в процесі прийняття рішень, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків продуктів і послуг на навколишнє середовище.

### 2.1. Визначення мети й обсягу

Мета аналізу полягала в оцінці викидів парникових газів, пов'язаних з виробництвом електроенергії фотоелектричними панелями з використанням кремнію моно і полікристалічного, працюючи в кліматичних умовах Любліна (південно-східна Польща).

Zakres analizy obejmuje produkcję elementów składowych systemu z uwzględnieniem fazy przedprodukcyjnej, budowę instalacji fotowoltaicznych (elementy składowe: panele z krzemu mono- i polikrystalicznego, inwerter, okablowanie, złączki, liczniki energii i zabezpieczenia) i fazę użytkowania.

Faza zagospodarowania końcowego z uwagi na wysoki odsetek części oddawanych do recyklingu oraz brak danych odnośnie energochłonności procesów ich ponownego uzdatnienia nie została uwzględniona.

Jednostką funkcjonalną jest 1 kWh energii wyprodukowanej w trakcie eksploatacji systemu w warunkach klimatycznych Lublina w oparciu o symulacyjne parametry pracy dostępne za pomocą portalu Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej [14].

## 2.2. Inwentaryzacja zbioru danych

Do analizy nakładów materiałowych i energetycznych wykorzystano bazę danych Ecoinvent, jak również dane producentów systemów funkcjonujących na rynku polskim. Inwentaryzacja obejmuje zużycie materiałów i energii w wymienionych etapach cyklu życia.

## 2.3. Ocena wpływu cyklu życia

Dla oceny wpływu cyklu życia, wykorzystano metodę oceny końcowej wyników LCA – Global Warming Potential (GWP100a), przy wykorzystaniu oprogramowania SimaPro v7.1. Technika ta pozwala na obliczenie wielkości emisji gazów cieplarnianych w jednostce masy -  $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$  [5].

Jednostka ta – masa ekwiwalentu ditlenku węgla – służy do oszacowania potencjału tworzenia efektu globalnego ocieplenia na podstawie emisji różnych gazów cieplarnianych w oparciu o charakterystyczny przelicznik na jednostkę masową  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  w zależności od przyjętego horyzontu czasowego [17]. W niniejszej pracy przyjęto wskaźniki dla stuletniego okresu oddziaływania.

## 2.4. Interpretacja

Wyniki analizy (emisja gazów cieplarnianych wyrażona w masie  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) przedstawiono w jednostce funkcjonalnej (1 kWh wytworzonej energii). Aby zagwarantować prawidłową interpretację, końcowe wyniki porównano z tradycyjnym systemem opartym na energii elektrycznej wytwarzanej, transportowanej i wykorzystywanej w Polsce.

## 3. Analiza systemów fotowoltaicznych

### 3.1. System I

Analizowany system ma na celu zapewnienie dostaw energii elektrycznej poprzez współpracę z wewnętrzną instalacją w budynku oraz siecią o niskim napięciu. Moc szczytowa systemu wynosi 6 kW<sub>p</sub>. Jego elementami składowymi są panele oparte na modułach krzemowych monokrystalicznych o łącznej powierzchni brutto 37,5 m<sup>2</sup>, okablowanie, złączki, elementy zabezpieczające oraz inwerter.

Montaż paneli został określony jako ekspozycja południowa o kącie nachylenia 45°. Instalacja pracuje w połączeniu z siecią, co umożliwia płynną pracę układu w warunkach niedostatecznej lub nadmiernej produkcji energii elektrycznej w zależności od aktualnego nasłonecznienia.

Sprawność modułów określona przez producenta jako 15,2% została skorygowana o straty wynikające z przesyłu energii oraz nierównomiernych warunków pracy układu.

### 3.2. System II

System II również ma na celu zapewnienie dostaw energii elektrycznej poprzez współpracę z wewnętrzną instalacją

Objęty analizą zawiera w sobie wytworzenie komponentów systemu, włączając etapy poprzedniego wytworzenia, montaż fotoelektrycznych systemów (elementy: panele krzemowe mono i polikrystaliczne, inwerter, przewódka, rozłączki, liczniki energii i zabezpieczenia) i fazę wykorzystania.

Zakończony etap oswojenia w związku z wysokim odsetkiem części skierowanych na przerobę i w przypadku braku danych o zużyciu energii, procesy powtarzającego czyszczenia nie były brane pod uwagę.

Funkcjonalną jednostką jest 1 kWh energii, która wytwarzana jest w czasie pracy systemu w warunkach klimatycznych Lublina na podstawie parametrów symulacji pracy dostępnych przez portal Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej [14].

## 2.2. Інвентаризація збору даних

Для аналізу матеріальних та енергетичних ресурсів, використано бази даних Ecoinvent, а також дані виробників систем, які працюють на польському ринку. Інвентаризація включає в себе використання матеріалів і енергії в збережених стадіях життєвого циклу.

## 2.3. Оцінка впливу життєвого циклу

Для оцінки впливу життєвого циклу, ми застосували метод кінцевих результатів оцінки LCA - Global Warming Potential (GWP100a), використовуючи програмне забезпечення SimaPro v7.1. Ця техніка дозволяє розрахувати викиди парникових газів на одиницю маси -  $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$  [5].

Ця одиниця - маса еквівалента діоксиду вуглецю - використовується для оцінки потенціалу створюючого ефекту глобального потепління по викидах різних парникових газів на основі розрахунку на одиницю маси  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  залежно від передбачуваного часового горизонту [17]. У цій статті показані показники для столітнього періоду впливу.

## 2.4. Інтерпретація

Результати аналізу (викиди парникових газів виражені в масі  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) представлені в функціональній одиниці (1 kWh виробленої енергії). Щоб гарантувати правильну інтерпретацію, остаточні результати були порівняні з традиційною системою, яка опирається на електроенергію, яка виробляється, транспортується і використовується в Польщі.

## 3. Аналіз фотоелектричних систем

### 3.1. Система I

Проаналізована система призначена для забезпечення постачання електроенергії за допомогою співпраці з внутрішньою інсталяцією в будинку та електромережею низької напруги. Максимальна потужність для системи 6 кВт<sub>п</sub>. Складовими компонентами є панелі в основі яких монокристалічні кремнієві модулі загальною площею бруто 37,5 м<sup>2</sup>, електропроводка, з'єднувачі, предмети безпеки і інвертор.

Установка працює спільно з мережею, яка забезпечує плавне функціонування системи в термінах недостатнього або надлишкового виробництва електроенергії в залежності від поточного сонячного світла.

Ефективність модулів, визначена виробником в 15,2% була скоректована з огляду на збитки, що виникають при постачанні електроенергії та нерівномірних умовах роботи системи.

### 3.2. Система II

Система II також спрямована на забезпечення постачання електроенергії за допомогою співпраці з внутрішньою

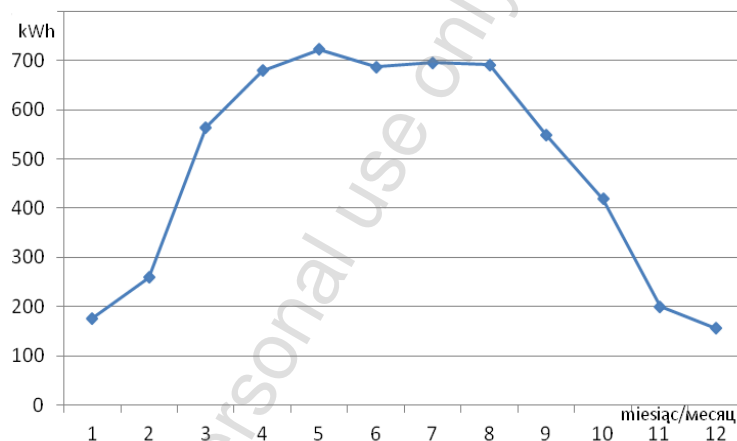
w budynku oraz siecią o niskim napięciu, przy czym opiera się on na technologii modułów zbudowanych z polikryształów krzemu. W celu zapewnienia właściwych warunków dla analizy porównawczej zaproponowano moc szczytową na jednakowym poziomie, korygując różnicę w sprawności modułów poprzez zwiększenie powierzchni paneli polikryсталicznych.

Elementami składowymi Systemu II są panele oparte na modułach krzemowych polikryсталicznych o łącznej powierzchni brutto 42,5 m<sup>2</sup>, okablowanie, złączki, elementy zabezpieczające oraz inwerter. Montaż i ekspozycja są jednakowe w przypadku Systemu I i II. Sprawność modułów określona przez producenta jako 13,4% została również skorygowana z uwagi na dodatkowe straty wynikające przesyłowe i związanie z nierównomiernością pracy.

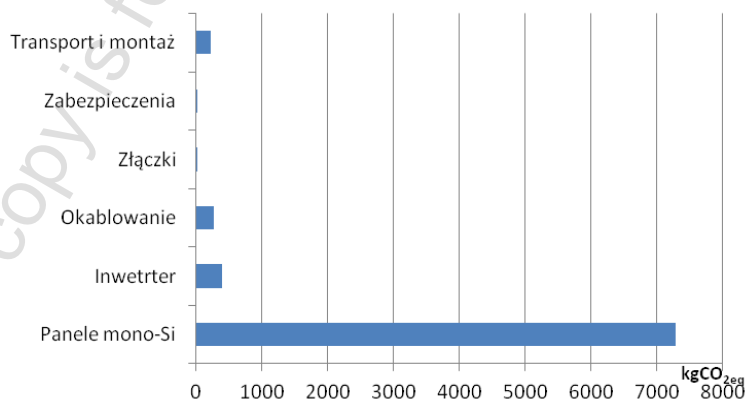
### 3.3. Cykl życia instalacji

Analizowane etapy cyklu życia obejmują fazę preprodukcji (dane z bazy Ecoinvent), produkcji elementów składowych układu, transportu oraz montażu. Uzysk energetyczny Systemów I i II w fazie użytkowania oszacowano z wykorzystaniem opisaną uprzednio aplikacją. W celu zwiększenia dokładności analizy przyjęto dwa horyzonty czasowe w każdym z dwóch analizowanych przypadków. Horyzont pierwszy to odpowiednio 35 i 30 lat pracy dla Systemu I i Systemu II, horyzont drugi to standardowe długości gwarancyjne (odpowiednio 30 i 25 lat).

Roczny uzysk energetyczny Systemu I w pierwszym roku jego pracy przedstawiono na rysunku 1. W dalszej analizie uwzględniono spadek wydajności ogniów w czasie pracy układu (90% po 10 latach, 80% po 25 latach).



Rys. 1. Uzysk energetyczny z instalacji fotowoltaicznej o mocy 6 kW<sub>p</sub> zlokalizowanej w Lublinie w poszczególnych miesiącach na bazie modelu JRC  
Мал. 1. Енергетичний ефект фотоелектричної системи з потужністю 6 кВт в кожному місяці на базі моделі JRC, знаходиться в Любліні



Rys. 2. Emisja CO<sub>2eq</sub> dla Systemu I  
Мал. 2. Викид CO<sub>2eq</sub> для системи I

установкою в будівлі та мережею низької напруги, основаної на технології модулів побудованих з полікристалічного кремнію. Для того, щоб забезпечити належні умови для порівняльного аналізу запропоновано тримати пікову потужність на тому ж рівні, коректуючи різницю продуктивності модулів збільшенням площі полікристалічних панелей.

Складовими компонентами панелей Системи II є панелі в основу яких входять полікристалічні кремнієві модулі загальною площею бруто 42,5 m<sup>2</sup>, електропроводка, з'єднувачі, система безпеки і інвертор. Установа і експозиція однакові в системі I і II. Ефективність модулів, зазначена виробником 13,4% була також переглянута у зв'язку з додатковими втратами при передачі і притаманною нерівномірністю роботи.

### 3.3. Життєвий цикл установки

Проаналізовані етапи Життєвого Циклу включають фазу підготовки виробництва (дані з бази даних Ecoinvent), компонентів системи, транспортування та монтаж. Вихід енергетичний систем I і II в фазі використання оцінено з описаними раніше додатками. Для того щоб збільшити точність аналізу прийнято два тимчасові горизонти в кожному з двох аналізованих випадків. Перший горизонт відповідно 35 і 30 років для системи I і System II, другий горизонт це стандартний термін гарантії (30 і 25 років).

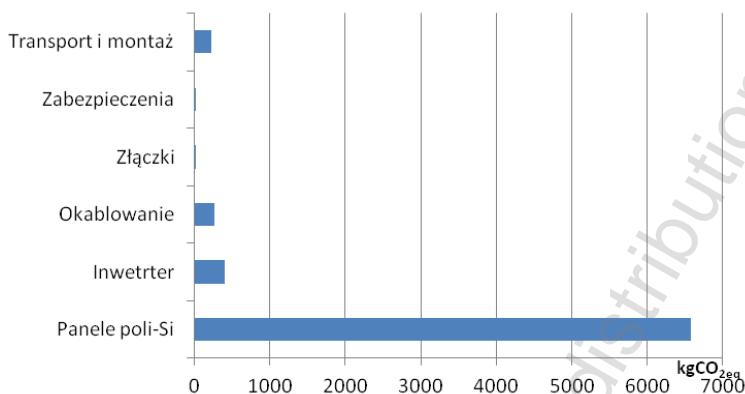
Річний вихід енергії і система в її перший рік роботи показані на малюнку 1. У подальшому аналізі включає в себе зниження продуктивності під час роботи системи (90% після 10 років, 80% після 25 років).

### 3.4. Wyniki ocen

Wyniki oceny Systemu I w podziale na poszczególne składowe systemu przedstawiono na rysunku 2.

Z uwagi na wysoką energochłonność procesów produkcji ogniw z krzemu monokrystalicznego, 89% emisji gazów cieplarnianych związane jest z wytwarzaniem paneli. Emisja ta w przypadku rozważanej instalacji wynosi ponad 7,2 tCO<sub>2eq</sub>. Kolejne istotne składniki bilansu to produkcja inwertera, okablowania oraz transport.

Wyniki oceny Systemu II w podziale na poszczególne składowe instalacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Emisja CO<sub>2eq</sub> dla Systemu II  
Mal. 3. Викиду CO<sub>2eq</sub> для Систему II

Procesy wytwórcze dla ogniw z krzemu polikrystalicznego pozwalają na dość znaczne oszczędności energii w porównaniu z technologią monokrystaliczną, jednak w analizowanym przypadku różnica ta jest częściowo kompensowana przez zwiększoną powierzchnię paneli w Systemie II. W tym przypadku produkcja paneli także odpowiada za większość emisji, dla rozważanego systemu jest to 88% udziału w wyniku końcowym.

Wyniki końcowe analizy w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej w pierwszym horyzoncie czasowym przedstawiają się następująco:

- System I – 46 gCO<sub>2eq</sub> na 1 kWh wytworzonej energii przy 35-letniej pracy układu,
- System II – 49 gCO<sub>2eq</sub> na 1 kWh wytworzonej energii przy 30-letniej pracy układu.

Przy uwzględnieniu mniej korzystnego wariantu czasu pracy instalacji, wyniki przedstawiają się następująco:

- System I – 53 gCO<sub>2eq</sub> na 1 kWh wytworzonej energii przy 30-letniej pracy układu,
- System II – 58 gCO<sub>2eq</sub> na 1 kWh wytworzonej energii przy 25-letniej pracy układu.

### 3.5. Dyskusja

Przytoczone powyżej scenariusze uwzględniają krótszy czas użytkowania instalacji z panelami opartymi na krzemie polikrystalicznym. W literaturze światowej stosowane są jednak powszechnie oceny nieuwzględniające tego zagadnienia.

Przy scenariuszu trzydziestoletniej pracy obydwu instalacji porównanie wypada korzystniej dla paneli z krzemu polikrystalicznego (System II). W pozostałych przypadkach, przy niejednolitej długości fazy użytkowania, wpływ czasu trwania cyklu życia jest na tyle istotny, że wskaźniki jednostkowe dla Systemu I przyjmują wartości niższe, niż analogicznie rozpatrywane wskaźniki dla Systemu II. Jest to na tyle istotne, że panele polikrystaliczne są z reguły postrzegane jako mniej energochłonne, co przełoży się na efekt środowiskowy wyłącznie w przypadku ich długoletniej i efektywnej pracy.

W celu właściwej oceny wielkości emisji, obliczone wskaźniki należy porównać z analogiczną emisją związaną

### 3.4. Результаты оценок

Результаты оценки Системы I в разбитии на отдельные компоненты системы, показаны на мал. 2.

Через высокую энергоёмность производных процессов монокристаллических кремниевых элементов, 89% выбросов парниковых газов, связанные с производством панелей. Эта проблема в случае правильной установки выносит более 7,2 tCO<sub>2eq</sub>. Другие важные компоненты баланса это производство инвертора, проводов и транспортирования.

Результаты оценки Системы II в разбитии на отдельные компоненты установки показаны на малюнку 3.

Процессы производства осердъ з полікристалічного кремнію дозволяють на досить значну економію енергії в порівнянні з монокристалічною технологією, але в даному випадку, різниця частково компенсується збільшенням поверхні панелей в системі II. У цьому випадку, виробництво панелей також несе відповідальність за більшість викидів, для розглянутої системи це 88% участі в кінцевому результаті.

Остаточні результати аналізу по відношенню до функціональної частини першого часового горизонту виглядають наступним чином:

- Система I – 46 гCO<sub>2eq</sub> за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 35 років функціонування системи,
- Система II – 49 гCO<sub>2eq</sub> за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 30 років функціонування системи.

Беручи до уваги менш крисний час роботи установки, результати наступні:

- Система I – 53 гCO<sub>2eq</sub> за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 30 років функціонування системи,
- Система II – 58 гCO<sub>2eq</sub> за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 25 років функціонування системи.

### 3.5. Обговорення

Зазначені вище сценарії включають в себе коротший час використання установки з панелями на основі полікристалічного кремнію. У світовій літературі, як правило, використовують загальні оцінки без урахування цього питання.

При тридцятилітній роботі обох установок кращі результати у панелі з полікристалічного кремнію (Система II). В інших випадках, при нерівномірній довжині використаної фази, вплив тривалості життєвого циклу настільки суттєвий, що показники для Системи I приймають значення нижчі, ніж аналогічно розглянуті показники для Системи II. Це є настільки значимим, що полікристалічні панелі, як правило, розглядаються, як менш енергоємні, що дозволяє вплинути на екологічну ситуацію тільки у разі тривалої та ефективної роботи.

При оцінці розрахунку викидів їх слід порівняти з аналогічним випромінювання у виробництві енергії з тради-

z produkcją energii ze źródeł konwencjonalnych. Wykorzystano bazę danych Ecoinvent jako źródło informacji o emisjach związanych energetyką w poszczególnych państwach.

Według przytoczonego źródła wskaźnik emisji gazów cieplarnianych szacowany metodą GWP100a wynosi 0,711 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh, co jest wielkością o rząd większą, niż przytoczone powyżej wyniki analiz. Pozwala to na sformułowanie podstawowego wniosku, iż fotowoltaika w postaci instalacji przyłączonych do sieci posiada wysoki potencjał ograniczania emisji ekwiwalentów ditlenku węgla. Redukcja emisji przy całkowitej substytucji wyniosłaby 92 – 93%, jednak z uwagi na specyfikę rozpatrywanych instalacji redukcja emisji zależeć będzie od stopnia pokrycia zapotrzebowania na energię w ujęciu całorocznym.

W odniesieniu do uzyskanych wyników należy ponadto zwrócić uwagę na kwestie źródeł danych. W pracy oparto się na jednym typie bazy danych o zasięgu europejskim, cytowanym wielokrotnie w podobnych analizach. Niemniej dla szerszego ujęcia problemu modelowania cyklu życia instalacji fotowoltaicznych należy oprzeć wyniki końcowe na konkurencyjnych źródłach.

Dodatkowo należy podkreślić, że przeprowadzona analiza nie uwzględnia fazy końcowego zagospodarowania produktów. Zagadnienie to obejmuje złożone kwestie recyklingu materiałów i ponownego ich wykorzystania i będzie stanowiło przedmiot odrębnej analizy.

Kolejnym aspektem jest kwestia pozostałych zanieczyszczeń emitowanych do gleby, wody i atmosfery w procesach produkcyjnych. W niniejszej pracy omówiono wyłącznie zagadnienie emisji ditlenku węgla i innych gazów cieplarnianych w przeliczeniu na jego ekwiwalent. Wielkość pozostałych istotnych dla środowiska emisji odniesieniu do elementów systemu stanowić będzie przedmiot kolejnych analiz.

#### 4. Podsumowanie

Jako uczestnik wielu międzynarodowych konwencji i państw zrzeszone w Unii Europejskiej, Polska jest zobowiązana do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i dostosowania przemysłu do wymagań wspólnoty. Jedną z istotnych kwestii jest zmiana struktury sektora energii przez zwiększenie udziału energii odnawialnej, co ma na celu obniżenie wielkości emisji gazów cieplarnianych, która dla Polski z uwagi na energetykę węglową przyjmuje znaczące wartości.

Koncepcja rozwoju energii odnawialnych jest zasadniczo zgodna z wymogami zrównoważonego rozwoju i prowadzi do redukcji zanieczyszczeń do środowiska i zmniejszenia wyczerpywania zasobów naturalnych. Wykorzystanie energii słonecznej jest jedną z metod realizacji tej koncepcji. Na podstawie przeprowadzonych analiz i oszacowanej emisji ekwiwalentu ditlenku węgla stwierdzono, że panele fotowoltaiczne mono- i polikrystaliczne mogą być traktowane jako proekologiczne i niskoemisyjne technologie.

Pomimo obliczonych znacznych emisji w procesie produkcji, w porównaniu do konwencjonalnych źródeł energii elektrycznej wytwarzanej w Polsce, oba analizowane systemy słoneczne charakteryzują się relatywnie niskimi wskaźnikami w odniesieniu do 1 kWh. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż znaczący wpływ na wielkości wskaźników ma przyjęty w analizie horyzont czasowy, dlatego należy zaakcentować konieczność stosowania rozwiązań warunkujących stabilną i długotrwałą pracę instalacji.

Technologie fotowoltaiczne znajdują się obecnie w fazie szybkiego rozwoju. Doniesienia medialne odnośnie coraz wyższych sprawności osiągniętych w warunkach laboratoryjnych świadczą o wysokim zaangażowaniu czołowych producentów i laboratoriów światowych w rozwój tej gałęzi energetyki. Należy tutaj podkreślić, iż praca nad zmniejszeniem energochłonności procesów produkcyjnych przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności ogniwi i wydłużeniu ich żywotności może się w przyszłości przyczynić do znacznego spadku wskaźników emisyjności obliczanych dla instalacji fotowoltaicznych.

ційних джерел. Використовуючи базу даних Ecoinvent, як джерело інформації з питань, пов'язаних з енергетикою в кожній країні.

Згідно з зазначеним джерелом послання, вказана кількість викидів парникових газів оцінюється 0,711 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh, що є на порядок більше, ніж у згаданих вище результатах. Це дозволяє нам сформулювати основний висновок, що фотовольтаїчні установки, підключені до мережі мають високий потенціал щодо скорочення викидів в еквіваленті діоксиду вуглецю. Скорочення викидів виносить 92 – 93%, але через специфіку даних установок скорочення викидів буде залежати від рівня попиту на енергію протягом усього року.

Щодо отриманих результатів, потрібно звернути увагу на джерела даних. Робота опирається на одному типі баз даних - європейському, який неодноразово цитувався у подібних аналізах. Тим не менш, для більш широкого визначення проблеми моделювання Життєвого Циклу фотоелектричних систем кінцеві результати повинні опиратися на конкуруючих джерелах.

Крім того, слід підкреслити, що проведений аналіз не врахував кінцевої фази утилізації продукту. Дана тема включає в себе питання утилізації і повторного використання, і буде предметом окремого аналізу.

Наступним аспектом є питання інших забруднюючих речовин, що викидаються в ґрунт, воду та повітря при виробничих процесах. У цій статті розглянуто виключно питання викидів двоокису вуглецю та інших парникових газів в обчисленні еквіваленту. Розмір інших істотних для середовища викидів по відношенню до компонентів системи будуть предметом подальших досліджень.

#### 4. Підсумок

Як учасник низки міжнародних конвенцій і держава, яка входять в Європейський Союз, Польща прагне знизити викиди парникових газів та адаптувати промисловість до вимог співтовариства. Одним з важливих питань є зміна структури енергетичного сектору за рахунок збільшення частки відновлюваних джерел енергії, ціллю Польщі є зниження викидів парникових газів з огляду на вартість вугілля.

Концепція розвитку відновлюваних джерел енергії в цілому відповідає вимогам сталого розвитку і веде до зниження забруднення навколишнього середовища та зменшення виснаження природних ресурсів. Використання сонячної енергії є одним із способів реалізації цієї концепції. На основі аналізу і оцінок викидів еквівалента діоксиду вуглецю, було виявлено, що фотоелектричні панелі монокристалічні і полікристалічні можна розглядати, як екологічно чисті і низьковуглецеві технології.

Незважаючи на значні викиди, в процесі виробництва, в порівнянні зі звичайними джерелами електроенергії, виробленої в Польщі, обидві проаналізовані сонячні системи характеризуються відносно низькими показниками з розрахунку до 1 kWh•год. Варто підкреслити, що значний вплив на розмір показників приймається в аналізі горизонту часу, тому потрібно підкреслити необхідність використання рішень, що забезпечують стабільну та довгострокову роботу пристрою.

Фотоелектричні технології в сьогоденні швидко розвиваються. В доповідях ЗМІ, що стосуються більш високої ефективності енергії, яка досягається в лабораторних умовах говориться про високу заінтересованість провідних виробників і лабораторій по всьому світу в розвитку енергетичного сектору. Слід підкреслити, що робота зі зниження енергоємності виробничих процесів при одночасному підвищенні ефективності сонячних колекторів і продовженням їхнього терміну служби може в майбутньому привести до істотного зниження викидів

## Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Agnieszka Żelazna oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

## Literatura || Література

- [1] Adamczyk J.: Koncepcja zrównoważonego rozwoju w zarządzaniu przedsiębiorstwem, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 2006.
- [2] Alsema E.A.: Energy Pay-back Time and CO<sub>2</sub> emissions of PV systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 8, I. 1, 2000, 17-25.
- [3] Ardente F., Beccali G., Cellura M., Lo Brano V.: Life cycle assessment of solar thermal collector. Renewable Energy, Vol. 30, 2005, 1031-1054.
- [4] Battisti R.G., Corrado A.: Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage. Journal of Cleaner Production, Vol. 13, 2005, 1295-1300.
- [5] Cel W., Pawłowski A., Cholewa T.: Ślad węglowy jako miara zrównoważoności odnawialnych źródeł energii / Carbon footprint as the sustainability indicator for renewable energy sources. Prace Komisji Ekologii i Ochrony Środowiska Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Vol. IV, 2010, 15-22.
- [6] Frankl P., Corrado A., Lombardelli S.: Photovoltaic (PV) systems, final report ECLIPSE. European Commission 2004.
- [7] Fthenakis V.M.: Life Cycle Impact analysis of cadmium in CdTe PV production. Renewable & Sustainable Energy Review, Vol. 8, 2004, 303-334.
- [8] Fthenakis V.M., Kim H.C., Alsema E.: Emissions from Photovoltaic Life Cycles. Environmental Science Technology, Vol. 42, 2008, 2168-2174.
- [9] Kalogirou S.: Environmental benefits of domestic solar energy systems. Energy Conversion and Management, Vol. 45, 2004, 3075-3092.

**Mgr inż. Agnieszka Żelazna**  
e-mail: a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

Mgr inż. Agnieszka Żelazna, ur. 05.03.1985, pracuje jako asystent w Instytucie Odnawialnych Źródeł Energii w Politechnice Lubelskiej. Jest absolwentką kierunku Inżynieria Środowiska o specjalności Ogrzewnictwo, Wentylacja i Klimatyzacja, a także studiów podyplomowych Zarządzanie Energią. Od roku 2009 jest pracownikiem Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej. Autorka jest uczestniczką programów współpracy z przemysłem, laureatką licznych stypendiów i wyróżnień, twórcą ponad 30 publikacji naukowych, a także polsko i anglojęzycznych podręczników poświęconych komputerowym metodom wspomagania projektowania. Obecnie pracuje nad rozprawą doktorską poświęconą tematyce ocen środowiskowych instalacji wykorzystujących energię słoneczną.

*otrzymano/отримано/received: 23.03.2015*

## Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Суспільства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Агнешці Желязній, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

- [10] Kalogirou S.: Thermal performance, economic and environment al life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. Solar Energy, Vol. 83, 2009, 39-48.
- [11] Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M.: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)/Ecological Life Cycle Assessment of manufacturing processes (LCA), PWN, 2007.
- [12] Pawłowski A.: Rewolucja rozwoju zrównoważonego. Problemy Ekorozwoju/Problems of Sustainable Development, Vol. 4, No 1, 2009, 65-76.
- [13] Popczyk J.: Ocena potencjału realizacji celów Pakietu 3x20, w szczególności w aspekcie redukcji emisji za pomocą różnych technologii. Zmiany klimatu – wyzwania dla gospodarki, Vol. 4, 2009, <http://csm.org.pl/>
- [14] [www.jrc.ec.europa.eu](http://www.jrc.ec.europa.eu), Joint Research Centre, 01.2015.
- [15] Zbiciński I., Staveniuter J., Kozłowska B., Van De Covering H.P.M.: Product Design and Life Cycle Assessment, Book 3 in a series on Environmental Management, The Baltic University Press, Uppsala 2006.
- [16] Zdyb A.: Badania nad zwiększeniem wydajności barwnikowych ogniw słonecznych. Monografie PAN, Vol. 94, Lublin, 2012.
- [17] Żelazna A., Pawłowski A.: Korzyści środowiskowe z wykorzystania systemów solarnych na przykładzie budynku jednorodzinne, Proceedings of ECOpole, Vol. 5(2), 2011, 649.

**Магістр інж. Агнешка Желязна**  
e-mail: a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

Магістр інж. Агнешка Желязна, народилася 05.03.1985, працює асистентом в Інституті Відновлювальних Джерел Енергії в Люблінській Політехніці. Випускниця факультету Інженерії Середовища за спеціальністю Опалення, Вентиляції та Кліматизація, а також післядипломного навчання за спеціальністю управління енергоспоживанням. З 2009 року є працівником факультету Інженерії Середовища в Люблінській Політехніці. Учасник програми співпраці з промисловістю, володар численних стипендій і відзнак, автор понад 30 наукових публікацій польською та англійською мовами, а також підручників з комп'ютерних методів проектування. В даний час працює над докторською дисертацією, на тему екологічних оцінок сонячних установок

*przyjęto do druku/принято до друку/accepted: 30.03.2015*

