

**Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek, prof. PW**

Instytut Pojazdów

Politechnika Warszawska

Ul. Narbutta nr 84, 02-524 Warszawa, Polska

E-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

**Mgr inż. Jakub Lasocki**

Zakład Ochrony Środowiska i Wykorzystania Energii Naturalnej

Przemysłowy Instytut Motoryzacji

Ul. Jagiellońska nr 55, 03-301 Warszawa, Polska

E-mail: j.lasocki@pimot.org.pl

## **Kompleksowa ocena oddziaływania na środowisko procesu przygotowania paliw bioetanolowych pierwszej i drugiej generacji**

**Słowa kluczowe:** *bioetanol, analiza Well-to-Wheel, emisja zanieczyszczeń, technologia wytwarzania paliw*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono informacje na temat kompleksowej oceny zagrożenia środowiska przez eksploatację pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi zasilanymi paliwem bioetanolowym. Przedstawiono założenia analizy ekologicznej cyklu istnienia paliwa według metody Well-to-Wheel, uwzględniającej etap przygotowania paliwa, składający się z pozyskiwania surowców, wytwarzania, transportu i dystrybucji, oraz etap użytkowania pojazdów. Zaprezentowano i porównano technologie oraz surowce stosowane w wytwarzaniu bioetanolu pierwszej i drugiej generacji. Przeanalizowano wyniki badań emisji gazów cieplarnianych oraz zużycia energii ze źródeł nieodnawialnych w procesie przygotowania paliw bioetanolowych pierwszej i drugiej generacji. Rozważono dziewięć wariantów przebiegu procesu wytwarzania, różniących się zastosowaną technologią i rodzajem przetwarzanej biomasy.

### **1. Wstęp**

Wytwarzanie i zastosowanie paliw ze źródeł odnawialnych, wśród których szczególne miejsce zajmuje bioetanol jako biopaliwo wytwarzane na największą skalę [15], od wielu lat nieustannie wzrastają. Do przyczyn tego trendu należą przede wszystkim: dążenie do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego poszczególnych państw oraz sprawy ochrony środowiska, związane nie tylko z możliwością poprawy właściwości ekologicznych silników spalinowych zasilanych paliwami pochodzenia biologicznego, ale również ze zmniejszeniem obciążenia środowiska w etapie wytwarzania paliwa.

Pierwsza z przyczyn wzrostu zainteresowania biopaliwami dotyczy postulatu uniezależnienia światowej gospodarki od dostaw ropy naftowej, który wynika z ograniczonych zasobów paliw kopalnych oraz z zagrożenia związanego z koncentracją surowców energetycznych dużej części świata w wąskiej grupie państw, niejednokrotnie niestabilnych politycznie. W ramach bezpieczeństwa energetycznego, ze względu na masowe wykorzystanie silników spalinowych, szczególną rolę odgrywają dostępność i cena paliw. Sytuacja, w której czynniki te silnie zależą od nastrojów panujących na światowych rynkach, jest wysoce niekorzystna. Uzasadnione wydaje się zatem realizowanie polityki dywersyfikacji źródeł energii, opartej na paliwach produkowanych z wykorzystaniem biomasy, której

dostępność – w postaci produktów rolnych i odpadów – jest dla wielu państw znacznie większa niż dostępność ropy naftowej.

Drugim, równie istotnym powodem coraz powszechniejszego podejmowania tematyki biopaliw są problemy ochrony środowiska. Społeczne zainteresowanie zagadnieniami negatywnego oddziaływania silników spalinowych – i w ogólności motoryzacji – na środowisko bardzo często ogranicza się do rozważania antropogenicznych przyczyn globalnych zmian klimatycznych, niekiedy wręcz jedynie do bilansowania emisji gazów cieplarnianych, szczególnie dwutlenku węgla kopalnego. Tymczasem najważniejszym i zarazem najbardziej dotkliwie odczuwalnym skutkiem zastosowania silników spalinowych jest bezpośrednie niebezpieczeństwo wynikające z emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia ludzi w skali lokalnej. Skrajny przykład stanowią obszary wielkich aglomeracji miejskich, w których znaczne natężenie ruchu pojazdów oraz niekorzystne warunki rozprzestrzeniania się spalin skutkują wysokimi poziomami emisji zanieczyszczeń.

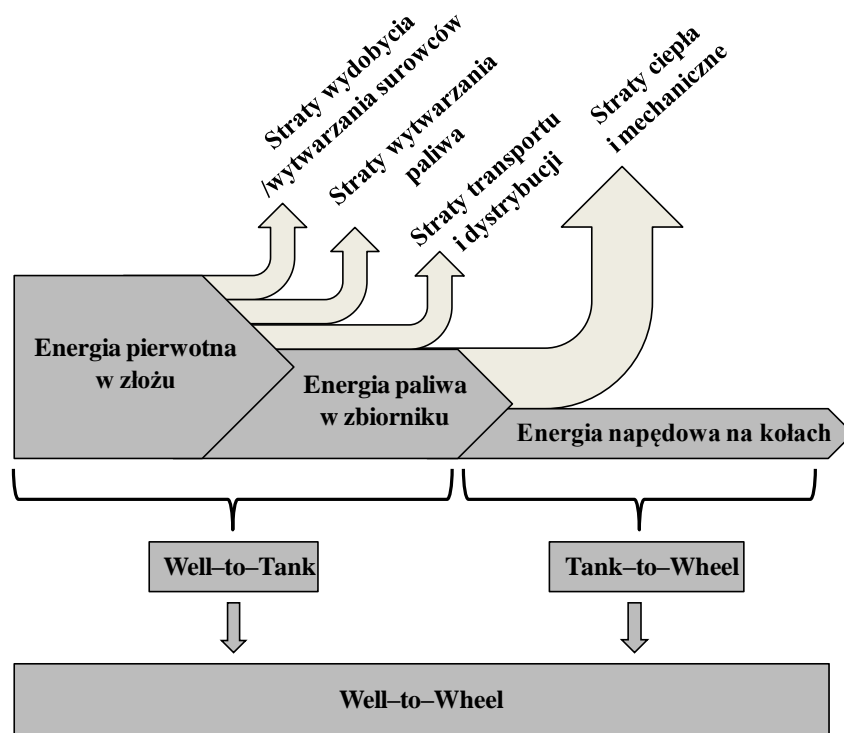
Rozpowszechnianie się zagadnienia zastosowania odnawialnych nośników energii rodzi potrzebę ich porównania w celu wyboru optymalnego rozwiązania. Niezależnie od czynników ekonomicznych, nadrzędnym zadaniem jest ocena właściwości ekologicznych poszczególnych rodzajów biopaliw. Dąży się przy tym do zminimalizowania oddziaływania na środowisko i ludzi, postrzeganego nie tylko w odniesieniu do pojedynczego aspektu oddziaływania, lecz oddziaływania rozumianego w sposób kompleksowy. Takie podejście oznacza jakościowe i ilościowe rozpoznanie ekologicznych niebezpieczeństw związanych z paliwem w każdym etapie jego okresu istnienia. Dotychczas najczęściej stosowane metody ograniczają się do pomiarów emisji substancji szkodliwych w badaniach wykonywanych w warunkach laboratoryjnych na hamowni podwoziowej (obejmujących cały pojazd) lub na hamowni silnikowej (obejmujących sam silnik). Wykorzystuje się przy tym różnego rodzaju testy: statyczne i dynamiczne. Zazwyczaj są to testy stosowane w procedurach homologacyjnych, co w zasadzie nie upoważnia do formułowania wniosków o właściwościach silników w warunkach ich rzeczywistego użytkowania. Badania tego typu umożliwiają jedynie analizę porównawczą zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń, zupełnie niedopuszczalne jest natomiast wnioskowanie na ich podstawie na temat inwentaryzacji energii i emisji. Potrzeba zatem narzędzia, które pozwoli na ocenę całego procesu przygotowania paliwa, obejmującego nie tylko końcową emisję zanieczyszczeń z pojazdu w trakcie jego eksploatacji, lecz również pozyskiwanie surowców do wytwarzania paliwa, sam proces wytwarzania, transport gotowego paliwa i jego dystrybucję. Narzędziem takim jest metoda Well-to-Wheel (w skrócie WtW), której nazwa oznacza „od źródła (pozyskiwania nośnika energii) do koła (pojazdu)”. Jest ona szczególnym wypadkiem zastosowania metody oceny cyklu istnienia LCA (Life Cycle Assessment) [12, 16] w odniesieniu do paliw silnikowych.

Przedmiotem rozważań przedstawianych w niniejszej pracy jest kompleksowa ocena emisji zanieczyszczeń i nakładów energetycznych związanych z procesem przygotowania bioetanolu pierwszej i drugiej generacji. Nie uwzględniono fazy eksploatacji pojazdów. Wiedza na temat właściwości ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń w czasie użytkowania pojazdów jest bowiem dużo bogatsza niż w wypadku etapu przygotowywania paliw – powszechnie znane są ekologiczne korzyści z zasilania silników spalinowych paliwami bioetanolowymi, m.in.: bardzo znaczne zmniejszenie emisji cząstek stałych i tlenu węgla, znaczne zmniejszenie emisji tlenków azotu i węglowodorów (w tym wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych), bardzo dobra biodegradowalność i możliwość ograniczenia emisji dwutlenku węgla kopalnego ze względu na odnawialność surowców (zastosowanie czystego bioetanolu skutkuje zerową emisją dwutlenku węgla kopalnego) [1 – 4, 14, 19]. Podczas gdy możliwości wprowadzenia zmian w celu ograniczenia emisji w fazie użytkowania pojazdów są zazwyczaj niewielkie, znacznie

większych korzyści można upatrywać w zoptymalizowaniu procesów wytwarzania i dystrybucji nośników energii. W wypadku pozyskiwania bioetanolu, zastosowanie odpadów celulozowych zamiast tradycyjnie wykorzystywanych: trzciny cukrowej i kukurydzy może skutkować znaczącym zmniejszeniem obciążenia środowiska.

## 2. Założenia do analizy zagrożenia środowiska metodą Well-to-Wheel

Metodę Well-to-Wheel można zdefiniować jako ilościową i jakościową analizę potencjalnego oddziaływania na środowisko procesów związanych z całym umownym okresem istnienia paliwa, który dzieli się na dwa etapy. Pierwszy z nich to etap przygotowania składający się z pozyskiwania surowców na nośniki energii, wytwarzania paliwa, transportu gotowego produktu i jego dystrybucji. Etap ten nosi w języku angielskim nazwę Well-to-Tank (w skrócie WtT), co oznacza od źródła (pozyskiwania nośnika energii) do zbiornika (paliwa). Drugi etap dotyczy użytkowania pojazdu: Tank-to-Wheel (w skrócie TtW), czyli od zbiornika (paliwa) do koła (pojazdu) [5 – 7, 19]. Schemat analizy Well-to-Wheel przedstawiono graficznie na rysunku 1, dodatkowo naniesiono straty energii w poszczególnych etapach.



Rys. 1. Schemat etapów analizy Well-to-Wheel

Zadaniami analizy Well-to-Wheel są: określenie i kwantyfikacja obciążeń środowiska wynikających ze sposobu realizacji poszczególnych procesów na każdym etapie okresu istnienia, a następnie ocena tego oddziaływania. Zadania te są realizowane poprzez dzielenie kolejnych etapów na pojedyncze procesy (cały zakres analizy tworzy tzw. system wyrobu, w tym wypadku paliwa), dla których wyznacza się zbiory danych wejściowych (np. nakłady energetyczne, surowce) i wyjściowych (np. produkty, półprodukty, odpady, emisje zanieczyszczeń). W ten sposób powstaje bilans materiałowy i energetyczny, który jest nazywany analizą (inwentaryzacją) zbioru cyklu istnienia LCI (Life Cycle Inventory)

[12, 16]. Niezbędne dane ilościowe pochodzą najczęściej z sektora gospodarki i od organów administracji rządowej związanych z ochroną środowiska. Analiza tego typu daje bardzo wymierne rezultaty, gdyż pozwala nie tylko na łączną ocenę całego okresu istnienia paliwa, ale również osobno poszczególnych procesów wchodzących w jego skład.

Za pomocą analizy LCI można wyznaczyć wartości skumulowanej emisji zanieczyszczeń, uzyskanej w bilansie materiałowym, oraz skumulowanych nakładów energetycznych, pochodzących z bilansu energetycznego, odniesione do tzw. jednostki funkcjonalnej [12], np. 1 km drogi pokonanej przez pojazd lub 1 MJ energii zawartej w paliwie.

Na podstawie bilansu energetycznego wyznacza się ilość energii potrzebną do przygotowania paliwa zużytego przez pojazd na pokonanie drogi o jednostkowej długości (jednostki: MJ/km, MJ/mi) albo ilość energii potrzebną do przygotowania paliwa odniesioną do ilości energii zawartej w gotowym paliwie (jednostka MJ/MJ) [6, 7, 19, 20].

Najczęściej stosowanym wskaźnikiem oddziaływania na środowisko jest łączna emisja gazów cieplarnianych występująca w całym okresie istnienia paliwa. Emisje poszczególnych gazów, z odpowiednimi współczynnikami wagi, sumuje się otrzymując emisję równoważną dwutlenku węgla (wg Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r., promującej stosowanie energii ze źródeł odnawialnych):

$$m_{\text{CO}_2, \text{eq}} = \sum m_x \cdot w_x \quad (1)$$

gdzie:  $m_x$  – emisja substancji  $x$ ,

$w_x$  – potencjał substancji  $x$  ze względu na zjawisko cieplarniane.

Wartość potencjału ze względu na zjawisko cieplarniane dla wybranych substancji wynosi:

- dla dwutlenku węgla: 1,
- dla metanu: 23,
- dla podtlenku azotu: 296.

Wskaźnik emisji gazów cieplarnianych przedstawiany jest w postaci emisji drogowej równoważnego dwutlenku węgla, tzn. wartości masy równoważnego dwutlenku węgla odniesionej do drogi przebytej przez pojazd (jednostki: g/km, g/mi) lub jako energetyczny wskaźnik emisji równoważnego dwutlenku węgla, czyli wartość masy równoważnego dwutlenku odpowiadającą ilości paliwa zawierającego 1 MJ energii (jednostka: g/MJ) [5 – 7, 19, 20].

Informacje uzyskane na drodze inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń i energii mogą być wykorzystane do porównania różnych rodzajów paliw, jednak nie dają one pełnego obrazu oddziaływania na środowisko. Z tego powodu powinno się dodatkowo rozważyć inne wskaźniki, które wykorzystując wyniki bilansu wejść i wyjść poszczególnych procesów przypisują im określone zagrożenia środowiskowe (tzw. kategorie wpływu), np. eutrofizację, zakwaszenie, hałas, drgania, smog, promieniowanie elektromagnetyczne, pył, zmianę zagospodarowania terenu, zmniejszenie zasobów paliw kopalnych, surowców mineralnych i wody, zmiany klimatu, zubożenie warstwy ozonowej i inne [12, 16]. Obliczenia wpływu cyklu istnienia paliwa w powyższych kategoriach prowadzi się z wykorzystaniem metod oceny wpływu cyklu istnienia LCIA (Life Cycle Impact Assessment), do których należą m.in.: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP, EPS2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEup, ReCiPe, Swiss Ecological Scarcity (szwajcarska metoda ekologicznego deficytu), TRACI, USEtox [9, 12, 16]. Ich niewątpliwą zaletą jest możliwość wskazania bezpośredniej zależności między rozpatrywanym procesem a elementami ekosystemu na które oddziałuje. Z drugiej strony wiele kontrowersji wzbudza subiektywizm w ocenie proponowanej przez

poszczególne metody, skutkującej znacznymi różnicami w otrzymywanych wynikach, nawet przy zastosowaniu tych samych danych wejściowych.

W warunkach europejskich popularną metodą oceny wpływu cyklu istnienia jest Eco-indicator 99 [5, 9, 12, 16]. Przedstawia ona oddziaływanie na środowisko za pomocą tzw. ekowskaźnika (eco-indicator), który łączy w sobie ocenę oddziaływania na środowisko w trzech obszarach wpływu:

- zdrowie człowieka,
- jakość ekosystemu,
- surowce.

Szkodliwość dla zdrowia człowieka jest wyrażona w tej metodzie indeksem DALY (Disability-Adjusted Life Year – rok życia skorygowany o niepełnosprawność), który jest jednostką miary oddziaływania choroby na człowieka zarówno pod względem czasu życia utraconego z powodu przedwczesnego zgonu (umieralność), jak i czasu przeżytego w stanie niepełnosprawności (chorobowość). Indeks ten wykorzystuje się powszechnie w ekonomii zdrowia do określenia stanu zdrowia danej populacji (stosowany jest m.in. przez Światową Organizację Zdrowia – WHO). W metodzie Eco-indicator 99 stworzono modele uwzględniające schorzenia układu oddechowego, nowotwory, skutki zmian klimatu, uszkodzenia warstwy ozonowej (powodujące m.in. raka skóry i zaćmę) oraz szkodliwość promieniowania jonizującego. Mierzy się przy tym m.in. ekspozycję na zanieczyszczenia oraz ich imisję.

Szkodliwość dla jakości ekosystemu określa się jako udział gatunków zanikających na danym obszarze w wyniku oddziaływania pojazdów (tu procesu wytwarzania paliwa) na środowisko. Bierze się pod uwagę m.in. zakwaszenie i eutrofizację wody i gleby, zmianę sposobu użytkowania gruntów (np. deforestacja) oraz tzw. ekotoksyczność, zdefiniowaną jako udział gatunków występujących na danym obszarze w określonym przedziale czasu, żyjących pod wpływem stresu toksycznego PAF (Potentially Affected Fraction).

Trzeci obszar wpływu – zużycie surowców jest oceniane przez wzgląd na jakość pozostałych do wydobywania złóż surowców, w tym paliw ropopochodnych. Określa się je jako nadwyżkę energii, jaką należy włożyć w eksploatację 1 Mg surowca (jednostka MJ/Mg). W niektórych wypadkach rozpatruje się także skalę wydobywania innych pierwiastków i związków.

Ekowskaźnik w postaci końcowej przyjmuje wartość będącą sumą wartości uzyskanych dla trzech obszarów wpływu z uwzględnieniem odpowiednich wag.

Inne podejście reprezentuje szwajcarska metoda ekologicznego deficytu (Swiss Ecological Scarcity Method) [5, 8], nazywana również metodą Ecoscarcity lub UBP'06 (Umweltbelastungspunkte). Podobnie jak w wypadku metody Eco-indicator 99, uwzględnia ona kilka obszarów wpływu badanego produktu czy procesu (np. eksploatacji pojazdu samochodowego) na środowisko. Brana jest pod uwagę głównie emisja zanieczyszczeń (czynniki takie jak: zakwaszanie i eutrofizacja, zmniejszanie warstwy ozonowej itd.) oraz wykorzystanie surowców naturalnych. Unikatowość metody polega na wyznaczeniu różnicy między aktualnym obciążeniem środowiska na danym obszarze – tzw. aktualnym strumieniem oddziaływania (current flow) i możliwym maksymalnym obciążeniem wynikającym z istniejących ograniczeń legislacyjnych lub celów politycznych – tzw. krytycznym strumieniem oddziaływania (critical flow). Pojęcia strumieni oddziaływania nie są sformalizowane, należy zatem je traktować jako wielkości fizyczne, charakteryzujące oddziaływanie cywilizacji na środowisko, takie jak np. imisja zanieczyszczeń, emisja drogowa czy emisja jednostkowa zanieczyszczeń wprowadzanych przez silniki spalinowe. Zgodnie ze szwajcarską metodą wynikiem oceny zagrożenia środowiska jest wskaźnik eco-factor, którego jednostkę zdefiniowano jako tzw. eko-punkt (eco-point, EP) dzielony przez

jednostkę charakteryzującą rozpatrywane oddziaływanie na środowisko (w wypadku emisji gazów cieplarnianych jest to EP/g). Wskaźnik eco-factor oblicza się według wzoru [8]:

$$\text{eco - factor} = K \cdot \frac{1 \cdot \text{EP}}{F_n} \left( \frac{F}{F_k} \right)^2 \cdot c \quad (2)$$

gdzie: K – współczynnik względnej szkodliwości oddziaływania,  
F – aktualny strumień oddziaływania,  
F<sub>n</sub> – znormalizowany strumień oddziaływania,  
F<sub>k</sub> – krytyczny strumień oddziaływania,  
c – wartość stała.

Wskaźnik eco-factor można zatem zdefiniować jako miarę potencjalnego zagrożenia środowiska jakie niesie ze sobą dane oddziaływanie. Jego wartość jest tym większa, im bardziej aktualny poziom emisji czy zużycia surowców naturalnych przekracza założone limity. Występujący we wzorze współczynnik względnej szkodliwości oddziaływania koryguje wynik rozróżniając substancje o bardziej lub mniej negatywnym wpływie na środowisko (jak w wypadku gazów cieplarnianych). Wartość aktualnego strumienia oddziaływania pochodzi zwykle z najnowszych dostępnych danych statystycznych dla danego obszaru.

Głównymi zaletami szwajcarskiej metody ekologicznego deficytu są: prosty sposób obliczeń oraz bezpośrednie odniesienie do politycznych celów i ograniczeń prawnych obowiązujących w danym regionie bądź państwie. Odróżnia ją to od metod kładących nacisk na bezwzględną ocenę szkód w środowisku (jak np. Eco-indicator 99). Jednak z drugiej strony wskaźniki eco-factor mogą być wyznaczane jedynie dla substancji, dla których istnieją wspomniane limity prawne lub cele polityczne.

Podsumowując przedstawione w niniejszym rozdziale rozważania na temat metod kompleksowej oceny paliw silnikowych, wskazać można dwie przeciwstawne tendencje. Z jednej strony, granice analizy Well-to-Wheel powinny być możliwie jak najszersze – dąży się do uwzględnienia wszystkich rodzajów oddziaływań i określenia ich pełnych konsekwencji ekologicznych. Natomiast z drugiej strony, aby dokonanie kompleksowej oceny w ogóle mogło być możliwe, należy jednoznacznie określić zakres badań wprowadzając pewne ograniczenia i przyjmując określone założenia. W konsekwencji uzyskanie obiektywnych wyników jest niezmiernie trudne, a uogólnienie wniosków może być źródłem wielu nadinterpretacji. Niemniej jednak, wobec konieczności oceny paliw silnikowych w sposób kompleksowy, mając na uwadze przedstawione ograniczenia, zastosowanie metody Well-to-Wheel wydaje się właściwym rozwiązaniem.

### 3. Technologia wytwarzania bioetanolu pierwszej i drugiej generacji

Zaletą paliw bioetanolowych jest możliwość otrzymywania ich z szerokiej gamy surowców. Na podstawie pochodzenia biomasy zastosowanej do wytwarzania dokonuje się umownego podziału bioetanolu na tzw. generacje [1, 14, 17, 18]:

- bioetanol pierwszej generacji otrzymuje się z surowców, które mogą być wykorzystywane w przemyśle spożywczym, np. z kukurydzy, ziemniaków, żyta, trzciny cukrowej, buraków cukrowych, ryżu i słodkiego sorgo; zawierają one cukry proste (glukozę, fruktozę), dwucukry (sacharozę, laktozę) lub cukier złożony – skrobię;
- bioetanol drugiej generacji powstaje z biomasy bogatej w ligninocelulozę oraz z odpadów i produktów ubocznych przemysłu przetwórczego; do najważniejszych substratów zalicza się: drewno, trawę, trzcinę, słomę, odpady drzewne przemysłu celulozowo-

papierniczego, omloty zbóż, kolby kukurydzy, odpady przemysłu młynarskiego i olejarskiego, zużyty budulec drzewny, odpady papiernicze, odpady komunalne (sucha część masy), melasę (produkt uboczny powstający w cukrowniach, bogaty w sacharozę) oraz serwatkę (odpad z procesu przetwórstwa mleka zawierający laktozę).

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną na świecie metodą otrzymywania bioetanolu jest fermentacja alkoholowa z wykorzystaniem drobnoustrojów, głównie drożdży *Saccharomyces cerevisiae*. Uogólniając, technologię wytwarzania można przedstawić w trzech etapach [11, 18]. Pierwszy z nich stanowi proces przygotowania surowca zwany scukrzaniem. Opiera się on na wstępnej hydrolizie cukrów złożonych do cukrów prostych. Drugim etapem jest właściwa fermentacja, zachodząca w środowisku wodnym pod katalitycznym wpływem enzymów wytwarzanych przez drożdże. Może ona być prowadzona w sposób okresowy albo ciągły, który jest metodą wydajniejszą, ale wymaga bardziej skomplikowanej aparatury. Po fermentacji następuje etap końcowy – wydzielenie alkoholu poprzez destylację. W ten sposób uzyskuje się bioetanol uwodniony zawierający ok. 5% wody. Aby ją usunąć, a tym samym otrzymać bezwodny bioetanol (o czystości ponad 99%), należy dodatkowo zastosować odwodnienie.

Najistotniejsze różnice w technologii wytwarzania bioetanolu pierwszej i drugiej generacji występują w etapie przygotowania substratów. Melasa i serwatka nie zawierają cukrów złożonych, dlatego w ogóle nie wymagają hydrolizy i mogą być bezpośrednio fermentowane. Skrobia, stanowiąca u roślin materiał zapasowy, łatwo ulega hydrolizie za pomocą preparatów enzymatycznych. Ligninoceluloza zaś, jako materiał konstrukcyjny komórek roślinnych, jest bardziej odporna na działanie czynników hydrolizujących. Stanowi ona kompleks trzech biopolimerów: celulozy, hemiceluloz i ligniny o różnym składzie powiązanych ze sobą wiązaniami kowalencyjnymi i wodorowymi [10, 17, 18]. W tym wypadku niezbędne jest przeprowadzenie wstępnej obróbki surowców, mającej na celu oddzielenie celulozy i hemicelulozy od ligniny, która jest aromatyczną substancją wielkocząsteczkową nie zawierającą cukrów, a więc nie ulegającą fermentacji. W tym celu stosuje się hydrolizę kwaśną, głównie z wykorzystaniem kwasu siarkowego, lub enzymatyczną. Drugi ze sposobów umożliwia osiągnięcie wysokiej wydajności procesu i jest obecnie w fazie rozwoju, prace zmierzają do obniżenia wysokiego kosztu pozyskiwania enzymów [10, 17, 18].

#### **4. Ocena wpływu na środowisko procesu przygotowania bioetanolu pierwszej i drugiej generacji**

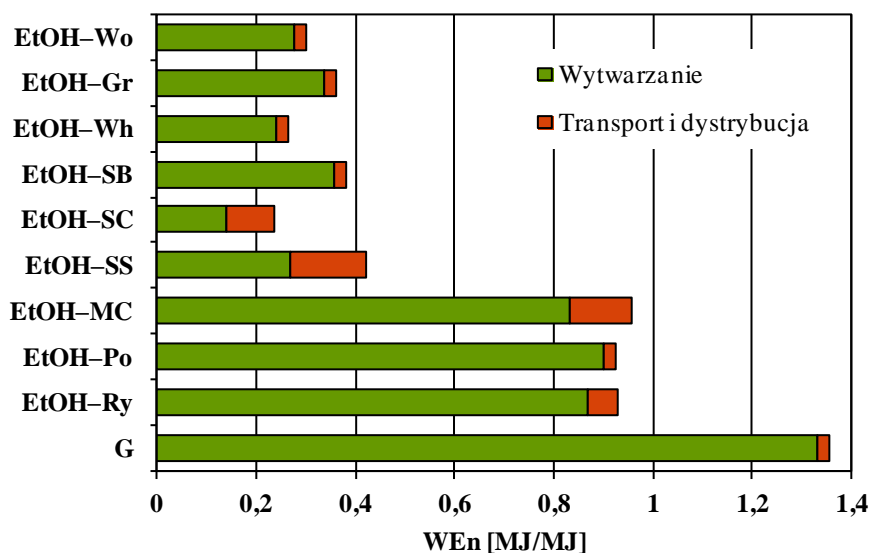
W niniejszej pracy przedstawiono i porównano wybrane wyniki oceny obciążenia środowiska charakteryzujące etap przygotowania (Well-to-Tank) bioetanolu pierwszej i drugiej generacji. Dane liczbowe pochodzą ze źródeł szwajcarskich [11, 20] i w większości odnoszą się do technologii wytwarzania bioetanolu w tym państwie. Wyjątki stanowią: bioetanol z trzciny cukrowej (produkowany w Brazylii), z kukurydzy (Stany Zjednoczone Ameryki), ze słodkiego sorgo (Chiny) oraz z żyta (warunki ogólnoeuropejskie). Zakres analizy obejmuje czynności związane z uprawą roślin, przeróbką biomasy na alkohol w fabryce oraz jego transportem do stacji paliw i końcową dystrybucją. Rozważono dziewięć wariantów przebiegu procesu wytwarzania, różniących się rodzajem przetwarzanej biomasy i odpowiadającej jej technologii, które znajdują obecnie praktyczne zastosowanie na świecie i są ekonomicznie uzasadnione. Trzy przykłady reprezentują biopaliwa drugiej generacji – otrzymywane z drewna, trawy i serwatki. W celach porównawczych załączono także analogiczne wyniki uzyskane dla benzyny. Przyjęto następujące oznaczenia:

- EtOH–Wo – bioetanol z drewna,
- EtOH–Gr – bioetanol z trawy,

- EtOH-Wh – bioetanol z serwatki,
- EtOH-SB – bioetanol z buraków cukrowych,
- EtOH-SC – bioetanol z trzciny cukrowej,
- EtOH-SS – bioetanol ze słodkiego sorgo,
- EtOH-MC – bioetanol z kukurydzy,
- EtOH-Po – bioetanol z ziemniaków,
- EtOH-Ry – bioetanol z żyta,
- G – benzyna.

Analizę Well-to-Tank oparto na inwentaryzacji zbioru wejść i wyjść danych dotyczących materiałów i energii biorących udział w danym procesie, mających wpływ na środowisko [20]. Jeśli podczas wytwarzania bioetanolu powstają produkty uboczne, takie jak energia elektryczna, podestylacyjny susz zbożowy DDGS (Dried Distillers Grains) czy wyciąki z trzciny cukrowej, wtedy alokacja emisji i nakładów energetycznych bazuje na szacowanych cenach rynkowych tych produktów (jest do nich proporcjonalna) [13]. Nie zostały natomiast uwzględnione inne czynniki ekonomiczne i socjalne. Obliczono jedynie bezpośredni wpływ na środowisko (bilans materiałowy i energetyczny), nie brano pod uwagę skutków ubocznych (np. uprawa roślin przeznaczonych do wytwarzania bioetanolu na obszarze, na którym wcześniej uprawiano rośliny do celów spożywczych, skutkuje niekiedy koniecznością sprowadzania niektórych produktów spożywczych z zagranicy, co wiąże się z dodatkowym transportem). W wypadku bioetanolu produkowanego w Brazylii, Chinach i Stanach Zjednoczonych Ameryki uwzględniono koszt transportu gotowego paliwa do Europy.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obliczeń całkowitej ilości energii ze źródeł nieodnawialnych niezbędnej do przygotowania bioetanolu i benzyny (etap WtT) zawierających 1 MJ energii.



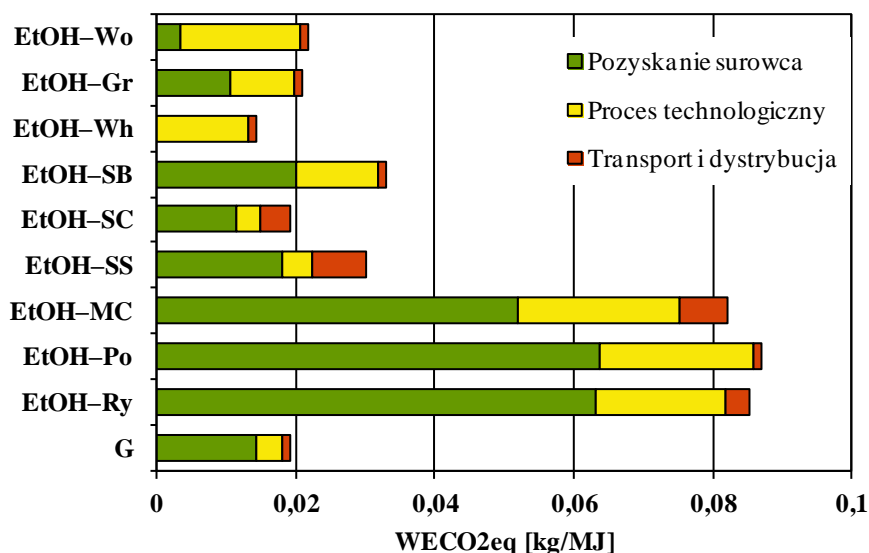
Rys. 2. Całkowita ilość energii ze źródeł nieodnawialnych zużyta podczas przygotowania paliwa zawierającego 1 MJ energii

Zużycie energii ze źródeł nieodnawialnych odpowiadające wytwarzaniu bioetanolu we wszystkich rozpatrywanych wariantach jest dużo mniejsze niż zużycie energii przy wytwarzaniu benzyny. Największe wartości uzyskano dla bioetanolu z kukurydzy, ziemniaków i żyta. Zawierają się one w granicach (0,9 ÷ 1) MJ/MJ. W pozostałych



wypadkach nie przekroczone poziomu 0,5 MJ/MJ. Przyczyną stosunkowo dużego zużycia energii nieodnawialnej w wytwarzaniu bioetanolu z kukurydzy w warunkach amerykańskich jest znaczne wykorzystanie paliw kopalnych w maszynach rolniczych, zaś w wypadku bioetanolu z ziemniaków i z żyta – mała wartość ekonomiczna produktów ubocznych oraz niska wydajność uprawy żyta z jednostki powierzchni. Najmniejsze zużycie energii ze źródeł nieodnawialnych charakteryzuje przygotowanie bioetanolu z trzciny cukrowej, co z jednej strony wynika z wysokiej wydajności upraw roślin z jednostki powierzchni ze względu na korzystne warunki pogodowe w Brazylii, z drugiej zaś strony energia potrzebna do procesu pochodzi w dużej mierze ze spalania wyłoków, które są odnawialnym produktem ubocznym z przetwórstwa trzciny cukrowej. W ten sam sposób można wytłumaczyć małe zużycie energii nieodnawialnej podczas wytwarzania bioetanolu ze słodkiego sorgo, jednak w tym wypadku ilość energii potrzebna do przetransportowania gotowego paliwa z Chin do Europy jest większa niż z Brazylii. Bardzo dobry rezultat uzyskany dla bioetanolu z serwatki (poniżej 0,3 MJ/MJ) wynika z faktu, że zgodnie z zasadami alokacji, na bioetanol przypada jedynie 20% nakładów energetycznych z całego procesu, większość zaś przypisuje się wysokobiałkowym produktom ubocznym. Zużycie energii nieodnawialnej dla bioetanolu z drewna i z trawy zawiera się w przedziale (0,3 ÷ 0,4) MJ/MJ, a więc jest niewiele większe niż dla bioetanolu z trzciny cukrowej, którą uprawia się w ciepłych strefach klimatycznych Brazylii, z wykorzystaniem dobrze rozwiniętej technologii masowej produkcji. W porównaniu z europejskimi wariantami technologii (z zastosowaniem ziemniaków, żyta i buraków cukrowych), a także z chińskim i amerykańskim, bioetanol drugiej generacji pozwala w znacznym stopniu ograniczyć zużycie energii ze źródeł nieodnawialnych.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki bilansu emisji gazów cieplarnianych w postaci wskaźnika energetycznego emisji wyznaczonego dla procesu przygotowania (etap WtT) bioetanolu i benzyny.

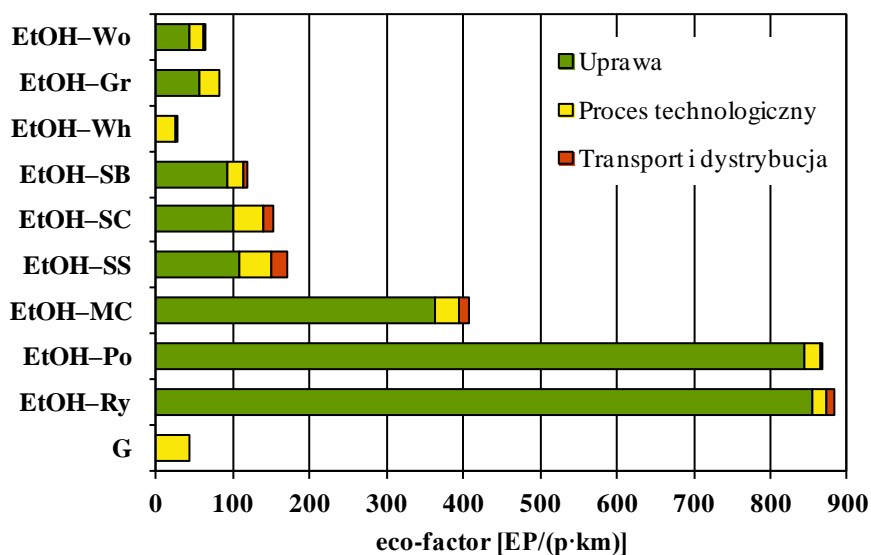


Rys. 3. Wskaźnik energetyczny emisji gazów cieplarnianych wyznaczony dla etapu przygotowania badanych paliw

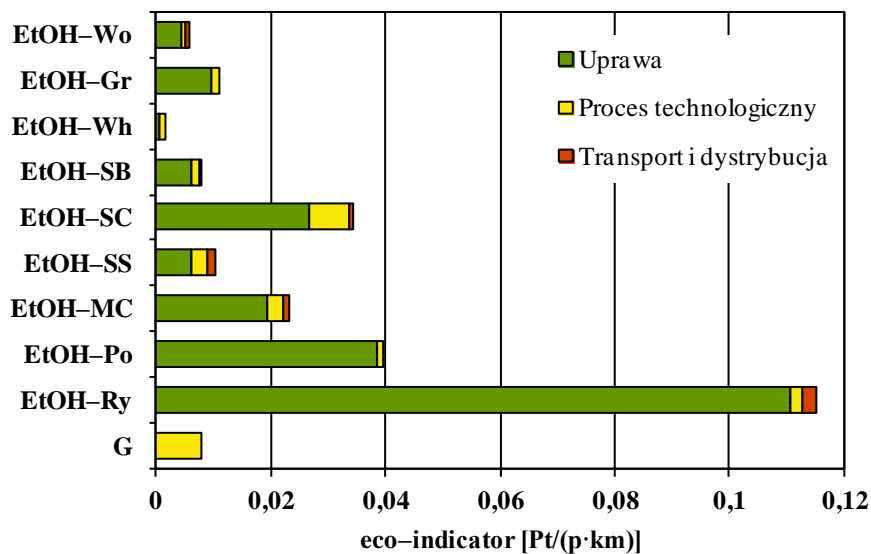
Wyróżniono trzy następujące fazy: pozyskanie surowca (uprawa roślin lub wydobywanie ropy naftowej), wytwarzanie paliwa oraz jego transport wraz z dystrybucją na stacjach paliw. Jak widać, w większości wypadków decydującą rolę odgrywa produkcja rolna. Lokalne wytwarzanie paliwa w państwie, w którym docelowo ma być ono rozprowadzane, skutkuje znaczącym ograniczeniem emisji związanej z transportem. Największe wartości wskaźnika,

analogicznie do wyników dotyczących zużycia energii nieodnawialnej, charakteryzują wytwarzanie bioetanolu z kukurydzy, ziemniaków i żyta, najmniejsze zaś z serwatki i z trzciny cukrowej. Jedynie w wypadku zastosowania dwóch ostatnich surowców osiągnięto wyniki zbliżone bądź lepsze niż dla benzyny. Niewiele większa wartość wskaźnika energetycznego emisji gazów cieplarnianych odpowiada przygotowaniu bioetanolu z drewna i z trawy, pomimo że w rozważanych technologiach wytwarzania biomasa pozyskiwana była ze źródeł mieszanych, takich jak: uprawy roślin energetycznych, lasy, różnego rodzaju łąki (naturalne i o intensywnym nawożeniu) oraz, w mniejszym stopniu, z odpadów. Gdyby rozważyć zastosowanie wyłącznie biomasy odpadowej, można byłoby wyeliminować emisję gazów cieplarnianych odpowiadającą fazie pozyskiwania surowca.

Na rysunkach 4 i 5 zestawiono wyniki oceny wpływu na środowisko procesu przygotowania paliw bioetanolowych i benzyny wyznaczone dwoma metodami: szwajcarską metodą ekologicznego deficytu (wskaźnik eco-factor) oraz metodą Eco-indicator 99 (wskaźnik eco-indicator). Każda z metod, stosownie do własnej skali, przypisuje określoną liczbę punktów odpowiadającą obciążeniu środowiska wynikającemu z przygotowania takiej ilości paliwa, którą pojazd zużywa na pokonanie drogi o długości 1 km. Spośród paliw bioetanolowych najmniej negatywny wpływ na środowisko w etapie WtT wykazują biopaliwa drugiej generacji – z serwatki, drewna i trawy. Dla bioetanolu z brazylijskiej trzciny cukrowej istotne zagrożenie środowiska wynika z wypalania pól przed zbiorem roślin, co przekłada się na wyższą wartość wskaźników oceny wpływu. Najgorsze właściwości ekologiczne przejawiają procesy przygotowania biopaliwa z zastosowaniem ziemniaków, kukurydzy i żyta. Wyróżniająca się, bardzo duża wartość wskaźnika otrzymanego metodą Eco-indicator 99 dla żyta wiąże się ze znacznym, jak na warunki europejskie, wykorzystaniem terenu, natomiast o przyznaniu dużej liczby punktów w szwajcarskiej metodzie ekologicznego deficytu w wypadku ziemniaków decydują zanieczyszczenie gleby nawozami i pestycydami.

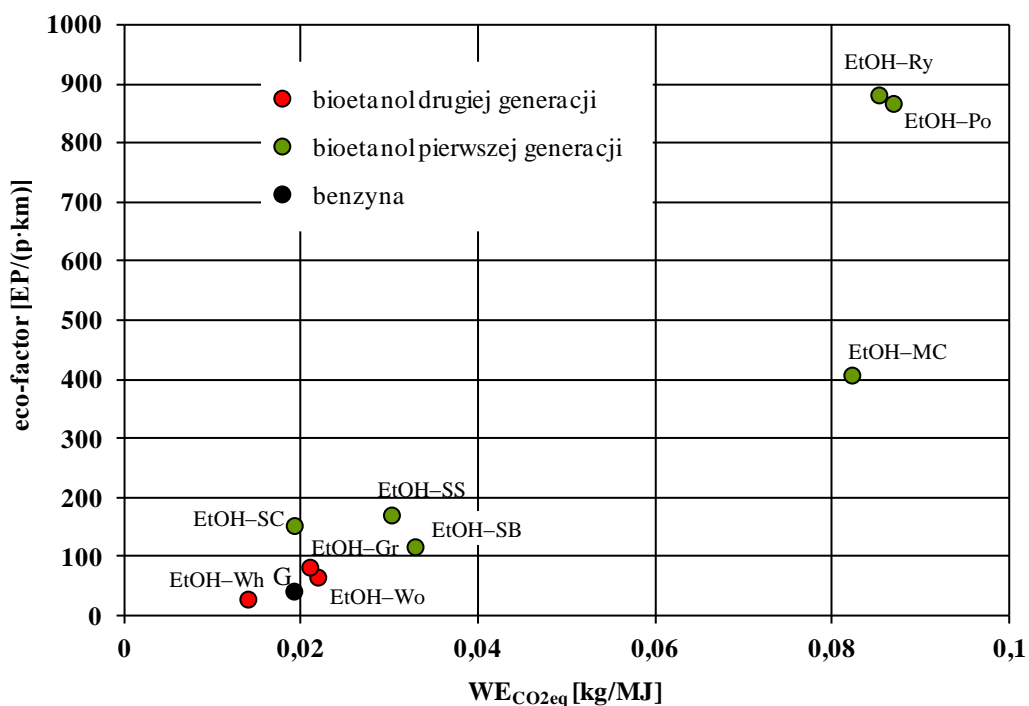


Rys. 4. Ocena wpływu na środowisko procesu przygotowania paliwa wyznaczona szwajcarską metodą ekologicznego deficytu



Rys. 5. Ocena wpływu na środowisko procesu przygotowania paliwa wyznaczona metodą Eco-indicator 99

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki dla rozpatrywanych paliw we współrzędnych: energetyczny wskaźnik emisji gazów cieplarnianych – eco-factor.



Rys. 6. Zestawienie energetycznych wskaźników emisji gazów cieplarnianych oraz eco-factorów wyznaczonych dla procesu przygotowania badanych paliw

Punkty, odpowiadające poszczególnym paliwom, stanowią informację o emisji gazów cieplarnianych oraz o kompleksowej ocenie oddziaływania na środowisko całego procesu przygotowania paliwa (WtT) według szwajcarskiej metody ekologicznego deficytu. Kolorem zielonym oznaczono bioetanol pierwszej generacji, kolorem czerwonym bioetanol drugiej generacji, zaś kolorem czarnym benzynę. Analiza wyników pozwala stwierdzić, że etap

przygotowania większości z rozważanych wariantów wytwarzania bioetanolu stanowi większe obciążenie dla środowiska niż wytwarzanie benzyny. Należy jednak podkreślić, że benzynę charakteryzują bardzo niekorzystne właściwości ekologiczne w etapie użytkowania (TtW), szczególnie wysoka emisja dwutlenku węgla kopalnego [4 – 7, 19, 20]. Spośród paliw bioetanolowych, najmniejszą ogólną szkodliwość dla środowiska wykazują technologie otrzymywania bioetanolu drugiej generacji z serwatki, drewna i trawy.

## 5. Podsumowanie

W związku z rozpowszechnianiem się zastosowania paliw z odnawialnych źródeł energii aktualnym problemem staje się potrzeba kompleksowej oceny emisji zanieczyszczeń i zużycia energii, uwzględniającej nie tylko etap użytkowania pojazdów lecz również cały proces przygotowania paliwa. Wśród biopaliw stosowanych obecnie do zasilania silników spalinowych największy udział na rynku światowym ma paliwo bioetanolowe [15]. Wynika to z licznych ekologicznych zalet bioetanolu, szczególnie z możliwości zmniejszenia emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla ludzi w skali lokalnej i dla ekosystemu w skali globalnej, oraz z zastosowania elastycznych pod względem surowców technologii otrzymywania bioetanolu – w ramach biopaliw pierwszej generacji z roślin jadalnych zawierających cukry oraz w ramach biopaliw drugiej generacji z ligninocelulozy i innych odpadów.

Na podstawie przedstawionych w niniejszej pracy rozważań można sformułować następujące wnioski na temat kompleksowej oceny oddziaływania na środowisko procesu przygotowania paliw bioetanolowych pierwszej i drugiej generacji:

1. Dla oceny emisji zanieczyszczeń i zużycia energii w etapie przygotowania bioetanolu najważniejsza jest technologia, w szczególności zaś jest istotny rodzaj zastosowanej biomasy.
2. Proces otrzymywania bioetanolu drugiej generacji, w porównaniu z bioetanolem pierwszej generacji, charakteryzuje się znacznie mniejszym obciążeniem środowiska. Dodatkowo poprzez zastosowanie wyłącznie surowców odpadowych, np. z przemysłu drzewnego lub papierniczego, zamiast uprawy tzw. roślin energetycznych, można uzyskać zerową emisję zanieczyszczeń przypadającą na fazę pozyskiwania biomasy.
3. Niezbędny jest dalszy rozwój technologii otrzymywania biopaliw drugiej generacji i jej optymalizacja w kierunku wysokiej wydajności procesu. Priorytetowy problem stanowi opracowanie sposobu obniżenia kosztów wytwarzania preparatów enzymatycznych stosowanych w hydrolizie ligninocelulozy.
4. Zastosowanie metody Well-to-Wheel, umożliwia jakościową i ilościową ocenę oddziaływania na środowisko całego umownego cyklu istnienia paliw silnikowych. Niemniej jednak, interpretując wyniki należy wziąć pod uwagę założenia i ograniczenia wynikające z przyjętych granic analizy.
5. Istotnym problemem jest dobór kompleksowych wskaźników obciążenia środowiska, a więc dobór kryteriów oceny. Podczas gdy inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń i nakładów energetycznych oparta jest na prostych zasadach bilansu materiałowego i energetycznego, to istniejące modele oceny wpływu cyklu istnienia (LCIA) wykazują dużą subiektywność.

Przedstawione rozważania dowodzą słuszności tezy, że zastosowanie bioetanolu drugiej generacji pozwala na uzyskanie wyraźnych korzyści ekologicznych w etapie wytwarzania paliwa. Niewątpliwie do takich technologii, wykorzystujących surowce odpadowe i produkty uboczne, należy przyszłość biopaliw.

## Piśmiennictwo

1. Baczewski K, Kałdoński T. Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Warszawa: WKŁ, 2008.
2. Carlsson H, Fenton P. Bioethanol for sustainable transport: Results and recommendations from the European BEST project. Environment Health Administration, City of Stockholm. Stockholm, 2010.
3. Chłopek Z. Ecological aspects of using bioethanol fuel to power combustion engines. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2007; 3: 65–69.
4. Chłopek Z. Ocena emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie iskrowym zasilanych paliwami: benzyną reformowaną i paliwem bioetanolowym E85. *Transport Samochodowy* 2009; 2: 61–78.
5. Chłopek Z, Lasocki J. Kompleksowa ocena zagrożenia środowiska przez eksploatację pojazdów samochodowych – Comprehensive evaluation of the environmental hazard caused by the operation of automotive vehicles. *Archiwum Motoryzacji – The Archives of Automotive Engineering* 2011; 4(54): 19–36, 109–126.
6. Edwards R, Mahieu V, Griesemann J, Larivé J, Rickeard D J. Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. SAE Technical Paper 2004-01-1924.
7. EPA Lifecycle Analysis of greenhouse gas emissions from renewable fuels. U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC, 2010.
8. Frischknecht R, Steiner R, Jungbluth N. The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006. A method for impact assessment in LCA. Environmental studies no. 0906. Federal Office for the Environment. Bern, 2009.
9. Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. Pre Consultants BV. Amersfoort, 2001.
10. Hamelinck C N, van Hooijdonk G, Faaij A. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy* 2005; 28: 384–410.
11. Jungbluth N, Chudacoff M, Dauriat A, Dinkel F, Doka G, Faist Emmenegger M, Gnansounou E, Kljun N, Schleiss K, Spielmann M, Stettler C, Sutter J. Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2007.
12. Kowalski Z, Kulczycka J, Góralczyk M. Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
13. Luo L, van der Voet E, Huppes G, Udo de Haes H. Allocation issues in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2009; 14: 529–539.

14. Marecka-Chłopek E, Chłopek Z. Eksploatacyjne aspekty zastosowania paliw pochodzenia biologicznego do zasilania silników spalinowych. *Transport Samochodowy* 2007; 4: 59–76.
15. Markevičius A, Katinas V, Perednis E, Tamašauskienė M. Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 3226–3231.
16. Pieragostini C, Mussati M C, Aguirre P. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 2012; 96: 43–54.
17. Sarkar N, Kumar Ghosh S, Bannerjee S, Aikat K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy* 2012; 37: 19–27.
18. Szewczyk K W. *Technologia biochemiczna*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
19. Unnasch S. Alcohol Fuels from Biomass: Well-to-Wheel Energy Balance. *Proceedings of the 15th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF)*. San Diego, 2005.
20. Zah R et al. *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. EMPA. St. Gallen, 2007.