

KOMPLEKSOWA OCENA ZAGROŻENIA ŚRODOWISKA PRZEZ EKSPLOATACJĘ POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

ZDZISŁAW CHŁOPEK¹, JAKUB LASOCKI²

Politechnika Warszawska

Streszczenie

W pracy przedstawiono poglądy na temat kompleksowej oceny zagrożenia środowiska przez eksploatację pojazdów samochodowych. Przedstawiono metody analizy emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla środowiska oraz nakładów energetycznych na etapach wytwarzania i dystrybucji nośników energii (od źródła pozyskiwania nośnika energii do zbiornika paliwa Well-to-Tank, w skrócie WtT) oraz użytkowania pojazdów (od zbiornika paliwa do koła pojazdu Tank-to-Wheel, w skrócie TtW). Przeanalizowano wyniki badań zgodnie z procedurami Eco-Indicator 99 oraz szwajcarskiej metody ekologicznego deficytu (ang. *Swiss Ecological Scarcity Method*), nazywanej inaczej metodą Ecoscarcity lub UBP'06. W podsumowaniu autorzy dokonali krytyki istniejących metod kompleksowej oceny szkodliwości motoryzacji dla środowiska i zaproponowali oryginalny system wskaźników, charakteryzujących efekty energetyczne i ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń, związane z motoryzacją na etapach wytwarzania i dystrybucji nośników energii oraz użytkowania pojazdów samochodowych.

Słowa kluczowe: motoryzacja, emisja zanieczyszczeń, analiza Well-to-Wheel, paliwa niekonwencjonalne.

1. Wstęp

Powszechność i masowość motoryzacji sprawiają, że społeczne odczucie jej oddziaływania na środowisko daleko przekracza racjonalny zakres. Jest to jednak w pewnym sensie uzasadnione, gdyż intuicyjnie nawet odczuwamy na każdym kroku, szczególnie w aglomeracjach miejskich oraz terenach zajmowanych przez trasy komunikacyjne, uciążliwość ekologiczną motoryzacji. Potrzeba oceny zagrożenia środowiska przez motoryzację jest bezdyskusyjna, ponieważ w celu racjonalizacji rozwoju motoryzacji, niezbędnej do funkcjonowania społeczeństwa, konieczne są narzędzia nie tylko jakościowego, ale i ilościowego rozpoznania ekologicznych niebezpieczeństw związanych z tym rodzajem aktywności ludzi. Jest to zadanie tym bardziej trudne, że nie sposób postawić jednoznacznych

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel. 22 234 85 59

² Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, jakub.lasocki@gmail.com, tel. 511 092 733

granic w obszarach działalności ludzi, związanej bezpośrednio i pośrednio, bliżej i dalej z motoryzacją. Podmiotami oddziaływania na środowisko, związanymi z motoryzacją są przede wszystkim pojazdy samochodowe, ale także ich wytwórnie oraz infrastruktura obsługowa i infrastruktura ruchu drogowego. Ważne miejsce wśród podmiotów oddziaływania motoryzacji na środowisko zajmują materiały eksploatacyjne, szczególnie paliwa, i ich wytwórnie. W dalszej kolejności można wymienić przemysł wydobywczy, energetyczny itd. Wyraźnego końca na tej liście praktycznie nie ma. Również rodzaje oddziaływania motoryzacji na środowisko są bardzo złożone, poczynając od wypadków drogowych, poprzez emisję zanieczyszczeń, promieniowania elektromagnetycznego i hałasu oraz powodowanie drgań, wycieki materiałów eksploatacyjnych, aż do zajmowania terenu i degradacji krajobrazu.

Widać zatem, że u podstaw kompleksowej oceny oddziaływania motoryzacji na środowisko muszą się znajdować jasne ograniczenia i konieczne jest przyjmowanie pewnych założeń, umożliwiających w ogóle dokonanie takiej oceny. Najczęściej ogranicza się ocenę tylko do emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla środowiska ludzi, w szczególności dla ich zdrowia. Bardzo często ogranicza się te badania wyłącznie do warunków użytkowania samochodów. Nawet przy tak dużych ograniczeniach są poważne problemy przyporządkowania poszczególnym zanieczyszczeniom pewnych wag szkodliwości, co umożliwiłoby porównanie rozpatrywanych sytuacji. Przykładem próby rozwiązania tego problemu jest zaproponowany w dyrektywie 2009/33/WE w sprawie promowania ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów algorytm przypisywania poszczególnym wybranym substancjom kosztów obciążenia środowiska. Kolejnym poważnym zagadnieniem jest przyjęcie porównywalnych modeli stanów pracy silników spalinowych, reprezentatywnych dla ich użytkowania w samochodach. Jest to problem tym bardziej ważny, że – jak wiadomo – emisja zanieczyszczeń jest bardzo wrażliwa na stany pracy silników spalinowych, szczególnie na występowanie stanów dynamicznych.

W związku z rozpowszechnianiem się problemu zastosowania odnawialnych nośników energii aktualna okazuje się potrzeba oceny emisji zanieczyszczeń i nakładów energetycznych z uwzględnieniem wytwarzania i dystrybucji tych nośników. Bardzo często społeczne zainteresowanie ogranicza się w tych wypadkach jedynie do emisji gazów cieplarnianych, a szczególnie dwutlenku węgla, co wynika bardziej z presji propagandowej niż z racjonalnych przesłanek. Zaniedbywanie w takich rozważaniach zagrożenia bezpośrednio niebezpiecznego dla zdrowia ludzi jest przejawem nie tylko niefrasobliwości niekompetentnych ideologów, ale i nieodpowiedzialności ludzi, którym społeczeństwa w naiwny sposób zaufały.

Kompleksowa ocena emisji zanieczyszczeń i nakładów energii związanych z wytwarzaniem, dystrybucją i użytkowaniem nośników energii w pojazdach jest przedmiotem rozważań przedstawianych w niniejszej pracy. Posłużono się w tym celu przykładami głównie z Europy Zachodniej, przede wszystkim ze Szwajcarii. Korzystając z tych przykładów autorzy starają się przekonać o znacznej względności wyników tych analiz i zachęcają do ostrożności w prowadzeniu takich badań.

Przytoczone metody badań są obciążone znaczną słabością formalną. Z tego powodu autorzy starają się, w miarę możliwości, unikać występujących w oryginalnych materiałach nieformalności i niezręczności, m.in. tłumacząc na język polski występujące w języku angielskim tak typowe dla cywilizacji zachodniej skomercjalizowane określenia, wadliwe językowo i nieprzystające nauce. Do najważniejszych spośród niezręcznych i wadliwych terminów należy „życie” odnoszone do przedmiotów. Powszechnie występujące określenia typu „cykl życia pojazdów” są przejawem marketingowej komercjalizacji języka. Autorzy konsekwentnie używają określenia „istnienie pojazdu”, bojąc nad tym, że nie udało im się znaleźć właściwego określenia w miejsce „cyklu”, bowiem – w istocie – istnienie pojazdu nie ma charakteru cyklicznego. Być może lepsze byłoby określenie „czas istnienia pojazdu” zamiast „cykl istnienia pojazdu”. Istnieją również poważne trudności w przyswojeniu polskiej nauce niesformalizowanych w oryginalnych źródłach pojęć, takich jak np. „strumienie oddziaływania”, które mają być może dużą wartość literacką, ale na pewno nie naukową.

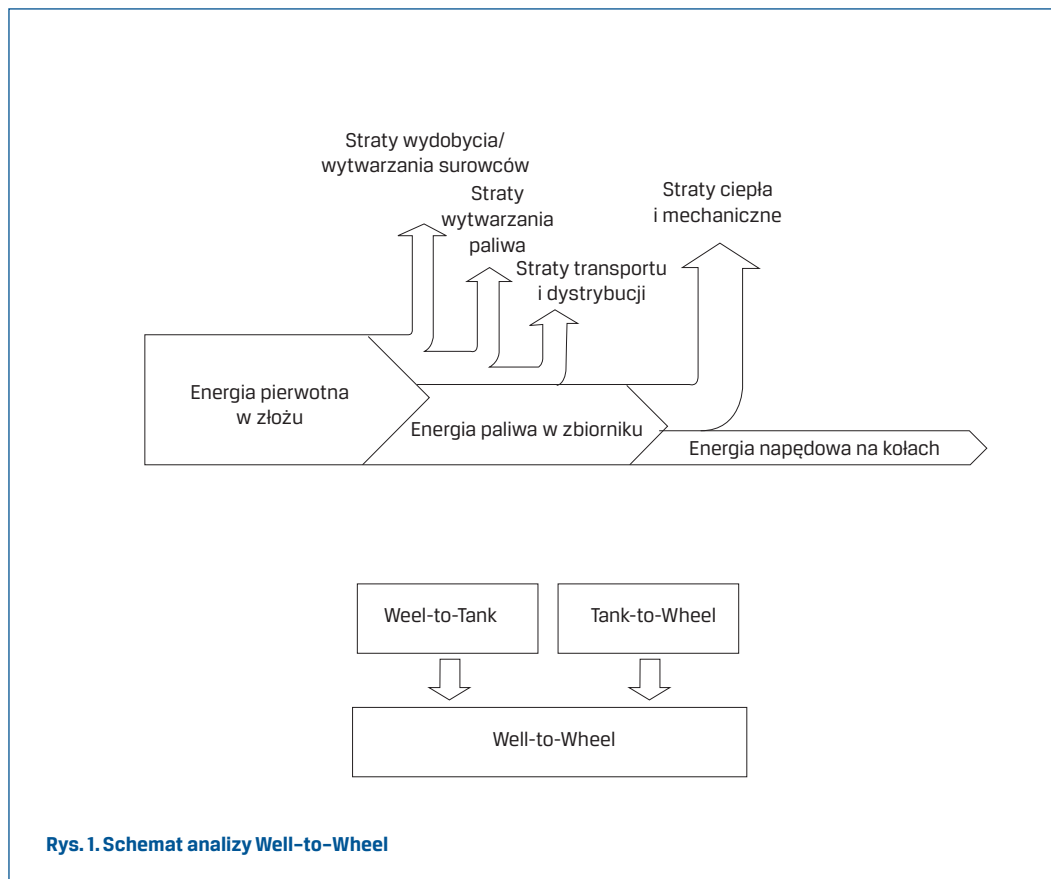
Mimo tych trudności w kompleksowym ocenianiu szkodliwości motoryzacji dla środowiska autorzy są świadomi konieczności podejmowania takich działań, upatrując mniejsze ryzyko w stosowaniu w ocenach minimalistycznych rozwiązań, np. w postaci znacznego ograniczenia ogólności prowadzonych analiz.

2. Założenia do analizy zagrożenia środowiska w cyklu istnienia pojazdu samochodowego

Bilansowanie zagrożeń środowiska w całym umownym cyklu istnienia pojazdu samochodowego odbywa się najczęściej przy użyciu określonej metody i odpowiedniego oprogramowania (ze względu na dużą ilość danych i niekiedy skomplikowane algorytmy obliczeniowe). Jedną z najczęściej stosowanych metod jest analiza „Well-to-Wheel” (WtW) [1, 3, 9, 10, 17–19], której nazwę można przetłumaczyć jako „od źródła (pozyskiwania nośnika energii) do koła (pojazdu)” [5, 8]. Obszarem zastosowań analizy Well-to-Wheel jest wyznaczanie emisji zanieczyszczeń (najczęściej gazów cieplarnianych) i zużycia energii związanego z zastosowaniem różnych rodzajów paliw oraz odpowiadających im możliwych napędów pojazdów. Uwzględnia się przy tym cały umowny cykl istnienia paliwa obejmujący pozyskiwanie nośników energii pierwotnej, przetwarzanie ich na nośniki energii wykorzystywane do napędzania pojazdu, transport i dystrybucję oraz końcową emisję zanieczyszczeń z pojazdu w trakcie jego eksploatacji. W praktyce analizę Well-to-Wheel rozpatruje się w dwóch etapach (rysunek 1) [1, 3, 5, 10, 13, 15, 17, 18]:

- od źródła pozyskiwania nośnika energii do zbiornika paliwa (Well-to-Tank – WtT),
- od zbiornika paliwa do koła pojazdu (Tank-to-Wheel – TtW).

Końcowym wynikiem jest suma zużycia energii i suma emisji zanieczyszczeń (gazów cieplarnianych) wyznaczone w obydwu etapach.



Rys. 1. Schemat analizy Well-to-Wheel

Pierwsza część analizy – etap Well-to-Tank – obejmuje procesy związane z przygotowaniem paliwa, a więc wytwarzanie lub wydobycie surowców (nośników energii pierwotnej), przeróbkę surowców, transport paliwa i jego rozdział, aż do zbiornika paliwa w pojeździe. Można określić sprawność tego etapu, zwaną sprawnością gotowości (tabela 1) [13] – jest to iloraz wartości ilości energii zawartej w gotowym paliwie (po odjęciu energii potrzebnej do jego przygotowania) i wartości ilości energii pierwotnej nośnika w postaci nieprzetworzonej. Straty energii i wielkości emisji zanieczyszczeń wynikające z przygotowania paliwa zależą nie tylko od jego rodzaju, lecz także od przyjętej metody produkcji i zastosowanego substratu. Jeżeli bowiem dla danego paliwa istnieje kilka możliwych technologii wytwarzania (na przykład wodór można otrzymywać poprzez reforming parowy metanu, gazyfikację węgla lub biomasy, pirolizę biomasy lub elektrolizę wody), to końcowy bilans energii i emisji będzie zależał od tego, którą z technologii poddano analizie.

Tabela 1. Względne straty energii występujące podczas cyklu przygotowania oleju napędowego, benzyny silnikowej, sprężonego gazu ziemnego (CNG) i sprężonego wodoru oraz łączna sprawność przygotowania tych paliw (na podstawie [13]).

Działania powodujące straty energii	Oleje napędowe	Benzyny silnikowe	Gaz ziemny (CNG)	Wodór
Wydobycie, wstępne przygotowanie i transport daleki	0,03	0,03	0,01	0,1
Przeróbka - rafinacja/reforming par	0,06	0,08	0	0,2
Dystrybucja wewnątrz krajowa (stacje szybkiego tankowania dla gazu ziemnego i wodoru)	0,02	0,02	0,12	0,17
Łączna sprawność przygotowania (po uwzględnieniu wartości energetycznej paliwa)	0,89	0,86	0,8	0,6

Opublikowano wiele opracowań literaturowych oraz obszernych raportów prezentujących nie tylko wyniki analiz Well-to-Wheel, lecz również rodzaje czynników uwzględniane w obliczeniach. W niniejszym artykule, na podstawie prac [1, 2, 3, 9, 10, 13, 14, 17–19], omówiono najważniejsze czynniki mające wpływ na ocenę paliwa na etapie jego przygotowania.

W analizie ciągnionej biopaliw pozyskiwanych z roślin energetycznych należy wziąć pod uwagę straty energii i zanieczyszczenie środowiska wynikające z prowadzenia uprawy. Uwzględnia się m.in. zużycie oleju napędowego w maszynach rolniczych, stosowanie nawozów azotowych, ilość wykorzystanej wody oraz umowne wartości emisji związane ze zmianą sposobu zagospodarowania terenów przeznaczonych pod uprawy roślin do produkcji biopaliw. Czynniki te można pominąć w przypadku paliw uzyskiwanych z biomasy odpadowej, przyjmując ich wartość równą zero. Szczególnie cenna jest możliwość zmniejszenia ilości wyemitowanego dwutlenku węgla przez wzgląd na asymilację tego gazu przez rośliny podczas wzrostu – w bilansie końcowym wielkość ta przyjmuje znak ujemny. Istotny aspekt stanowi również sposób wykorzystania produktów ubocznych powstających podczas przerobu biomasy. Część z nich może zostać zużyta w innych gałęziach przemysłu, np. gliceryna z produkcji biodiesla znajduje zastosowanie w przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym, papierniczym i innych, a przy produkcji bioetanolu ze zboża otrzymuje się karmę dla zwierząt. Takie produkty uboczne zastępują produkty wytwarzane w konwencjonalny sposób, przyczyniając się do zmniejszenia zużycia energii i ograniczenia emisji zanieczyszczeń. Emisję powstałą podczas produkcji dzieli się zwykle pomiędzy paliwo i produkty uboczne, proporcjonalnie do ich zawartości energii. Dużo kontrowersji wzbudza wykorzystywanie do produkcji biopaliw substratów, które mogłyby być użyte w innym celu, np. zboże do produkcji żywności i paszy dla zwierząt, trzcina cukrowa do produkcji cukru, czy drewno do uzyskania energii cieplnej. W bilansie energetycznym istnienie tego typu rozwiązania energetycznego traktowane jest jako czynnik negatywny.

W odróżnieniu od biopaliw, technologia otrzymywania gazu ziemnego jest znacznie mniej skomplikowana. Głównymi czynnikami, jakie należy uwzględnić na etapie od źródła pozyskiwania do zbiornika paliwa są: wydobycie, transport rurociągami i sprężanie (CNG) lub skraplanie (LNG) na stacji paliw.

Najistotniejsze znaczenie w analizie przygotowania wodoru ma zastosowana metoda produkcji. W przypadku reformingu parowego gazu ziemnego, który jest obecnie najbardziej rozpowszechniony, rozpatruje się zwłaszcza transport gazu ziemnego, sam proces reformowania parowego metanu i sprężanie wodoru na stacji paliw. Jeżeli natomiast wodór powstał w wyniku elektrolizy wody, w bilansie emisji i energetycznym ważne jest ustalenie pochodzenia energii elektrycznej. Wodór uznaje się za „czysty” (biowodór) jeśli został uzyskany przy wykorzystaniu energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych (np. elektrownie wiatrowe lub słoneczne). W przeciwnym razie emisję towarzyszącą pozyskaniu energii elektrycznej należy dołączyć do bilansu emisji wodoru.

Paliwa konwencjonalne charakteryzują się znacznym zapotrzebowaniem energii na wydobycie i transport ropy naftowej do rafinerii, następnie na wytworzenie benzyny lub oleju napędowego oraz transport do odbiorcy końcowego. Często wyniki bilansu dla paliw ropopochodnych w analizie Well-to-Wheel traktuje się jako poziom odniesienia do porównania właściwości ekologicznych różnych rodzajów paliw niekonwencjonalnych.

Wymienione przykłady danych wykorzystywanych w analizach etapu Well-to-Tank mają jedynie charakter orientacyjny. W rzeczywistości prawie każda z wymienionych operacji może być realizowana na kilka różnych sposobów, np. transport wodny, szynowy i kołowy wiążą się z innymi wydatkami energetycznymi i emisjami zanieczyszczeń. Ocena danego paliwa jest zatem bardzo wrażliwa na przyjęte założenia.

W drugim etapie – od zbiornika paliwa do koła pojazdu (Tank-to-Wheel) – badana jest emisja zanieczyszczeń i zużycie paliwa przez pojazd. Decydujące znaczenie w tej części analizy ma rodzaj zastosowanego paliwa, rodzaj układu oczyszczania spalin oraz ogólna sprawność układu napędowego [13] – największa dla ogniw paliwowych, mniejsza dla silników o zapłonie samoczynnym i najmniejsza dla silników o zapłonie iskrowym (hybrydyzacja z zastosowaniem silnika elektrycznego pozwala na dodatkowy wzrost sprawności ogólnej) [1].

Badania wykonuje się zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych na hamowni podwoziowej (obejmują wtedy cały pojazd) lub na hamowni silnikowej (obejmują wówczas sam silnik) z wykorzystaniem różnego rodzaju testów, zarówno statycznych, jak i dynamicznych. Zazwyczaj wykorzystuje się testy stosowane w procedurach homologacyjnych, co w zasadzie nie upoważnia do formułowania wniosków o właściwościach silników w warunkach ich rzeczywistego użytkowania. Jest to najpoważniejsza słabość powszechnie stosowanych metod analiz oddziaływania motoryzacji na środowisko. Co prawda stosowanie do badań silników testów homologacyjnych umożliwia analizy porównawcze efektów energetycznych i emisji zanieczyszczeń, ale formułowanie sądów o inwentaryzacji energii i emisji zanieczyszczeń, co jest powszechną praktyką, zarówno wśród specjalistów, jak i wśród ludzi czynu: propagandystów i polityków, jest już zupełnie niedopuszczalne.

Niezależnie od zastrzeżeń metodologicznych – przynajmniej w zamyśle badaczy – ostatecznym wynikiem analizy Well-to-Wheel jest suma nakładów energii i łączna masa zanieczyszczeń wyemitowanych na obydwu etapach: przygotowania paliwa (Well-to-Tank) i jego wykorzystania w pojeździe (Tank-to-Wheel).

Na podstawie bilansu energetycznego określa się ilość energii potrzebną do przygotowania paliwa zużytego przez pojazd na pokonanie drogi o jednostkowej długości (jednostki: MJ/km, MJ/mi). Zwykle podaje się też inne wskaźniki, np. zdefiniowaną wcześniej ogólną sprawność cyklu Well-to-Wheel [1, 3, 9, 10, 13, 17–19].

Bilansując emisje gazów cieplarnianych (dwutlenku węgla oraz m.in. metanu i podtlenku azotu) dla całego cyklu, sprowadza się je do ekwiwalentnej emisji dwutlenku węgla CO_{2eq} , a następnie sumuje. Poszczególным gazom przypisywane są odpowiednie wartości równoważnika dwutlenku węgla, proporcjonalnie do ich potencjalnego udziału w nasilaniu rozwoju zjawiska cieplarnianego (dane liczbowe zaczerpnięto z dyrektywy 2009/28/WE):

- dwutlenek węgla – 1,
- podtlenek azotu – 296,
- metan – 23.

Postępowanie takie ułatwia obliczenia emisji gazów cieplarnianych oraz końcową interpretację i porównanie wyników. Ostatecznie emisję gazów cieplarnianych charakteryzuje się jako emisję drogową ekwiwalentnego dwutlenku węgla, tzn. wartość masy ekwiwalentnego dwutlenku węgla wyemitowanego podczas przygotowania paliwa i jego wykorzystania w pojeździe odniesioną do drogi przebytej przez ten pojazd (jednostki: g/km, g/mi) lub jako energetyczny wskaźnik emisji ekwiwalentnego dwutlenku węgla, czyli wartość masy ekwiwalentnego dwutlenku węgla wyemitowanego podczas przygotowania i spalania paliwa zawierającego 1 MJ energii (jednostka: g/MJ) [1, 3, 9, 10, 13, 17–19].

Szczegółowe zasady obliczania całkowitej emisji gazów cieplarnianych na etapie Well-to-Tank dla różnego rodzaju biopaliw używanych w krajach Unii Europejskiej określa zaimplementowana przez Polskę Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r., promująca stosowanie energii ze źródeł odnawialnych. Postanowienia dyrektywy stanowią podstawę oceny, czy każde z państw członkowskich Unii Europejskiej zdoła osiągnąć zakładany minimalny udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 r. (tzw. narodowy cel wskaźnikowy). Zgodnie z dyrektywą, całkowity energetyczny wskaźnik emisji ekwiwalentnego dwutlenku węgla (inaczej: gazów cieplarnianych) wyznacza się na podstawie wzoru:

$$WE = WE_{ec} + WE_l + WE_p + WE_{td} + WE_u - WE_{sca} - WE_{ccs} - WE_{ccr} - WE_{ee} \quad (1)$$

gdzie:

WE_{ec} – energetyczny wskaźnik emisji spowodowanej wydobywaniem lub uprawą surowców,

- WE_1 – energetyczny wskaźnik emisji w ujęciu rocznym spowodowanej zmianami ilości pierwiastka węgla w związku ze zmianą sposobu użytkowania gruntów,
- WE_p – energetyczny wskaźnik emisji spowodowanej procesami technologicznymi,
- WE_{td} – energetyczny wskaźnik emisji spowodowanej transportem i dystrybucją,
- WE_u – energetyczny wskaźnik emisji spowodowanej stosowanym paliwem,
- WE_{sca} – ograniczenie energetycznego wskaźnika emisji spowodowane akumulacją pierwiastka węgla w glebie dzięki lepszej gospodarce rolnej,
- WE_{ccs} – ograniczenie energetycznego wskaźnika emisji spowodowane wychwytywaniem dwutlenku węgla i jego składowaniu w głębokich strukturach geologicznych,
- WE_{ccr} – ograniczenie energetycznego wskaźnika emisji spowodowane wychwytywaniem dwutlenku węgla i jego zastępowaniem,
- WE_{ee} – ograniczenie energetycznego wskaźnika emisji dzięki zwiększonej produkcji energii elektrycznej w wyniku kogeneracji.

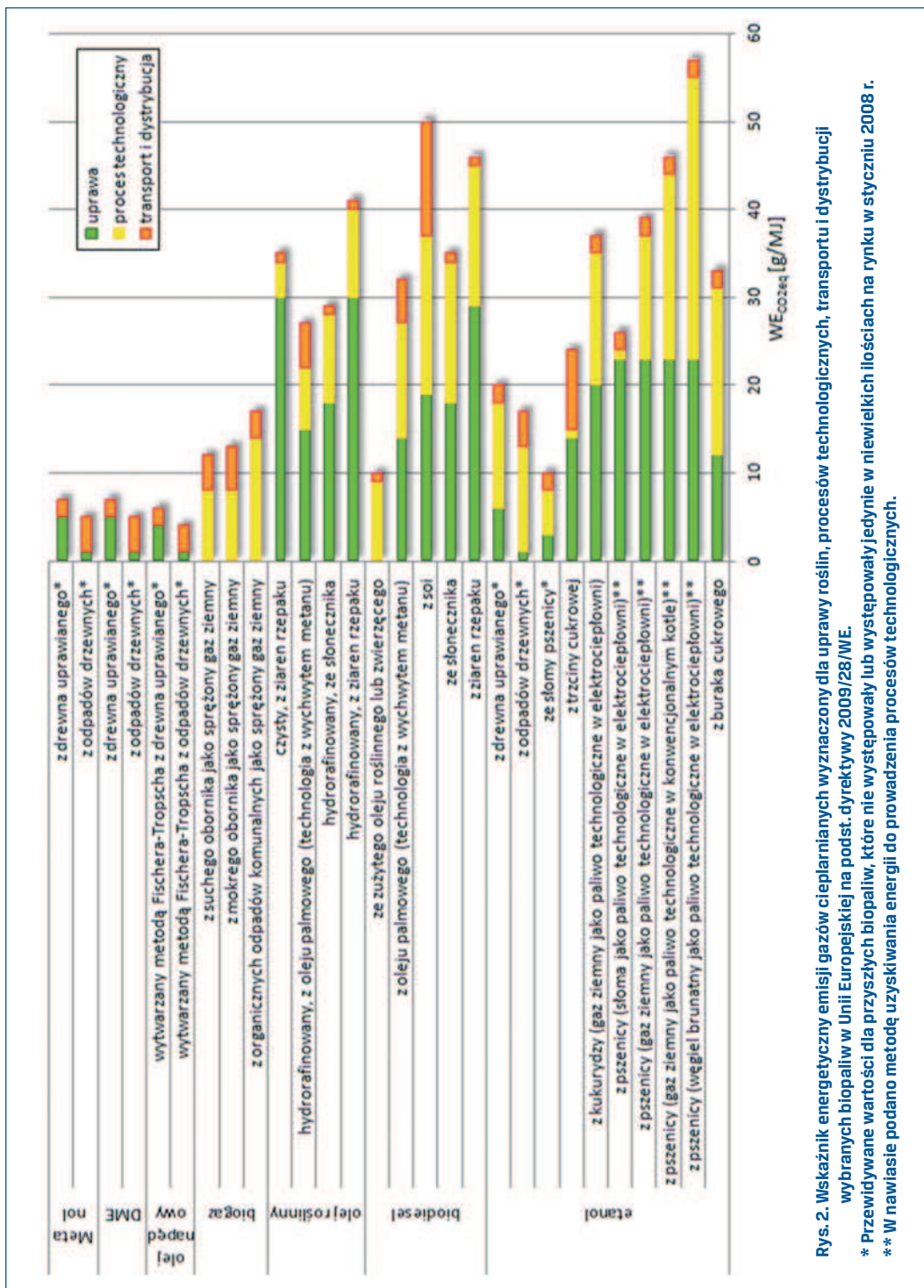
Definicje wielkości uwzględnionych w powyższym wzorze wyszczególniono w dyrektywie, podano tam również ich wartości albo sposób obliczania w zależności od rodzaju biopaliwa, metody jego otrzymywania i surowca wykorzystywanego do produkcji.

Przykładowe wyniki obliczeń całkowitego energetycznego wskaźnika emisji dwutlenku węgla spowodowanej uprawą roślin, produkcją (z wykorzystaniem różnych technologii), transportem i dystrybucją wybranych biopaliw przedstawiono w sposób zbiorczy na rysunku 2.

Niejednokrotnie poddając analizie zagrożenia środowiska spowodowane eksploatacją pojazdów samochodowych, poza całkowitą emisją i zużyciem energii, uwzględnia się także inne dodatkowe wskaźniki porównawcze. Niektóre z nich zestawiają wpływ pojazdu na środowisko na kilku różnych płaszczyznach oddziaływania, dążąc do oceny jakościowej. Przykładem jest tzw. „ekowskaźnik” (ang. *ecoindicator*), wyznaczany w metodzie Eco-indicator 99 [12, 16], 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 (ang. *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.



Rys. 2. Wskaźnik energetyczny emisji gazów cieplarnianych wyznaczony dla uprawy roślin, procesów technologicznych, transportu i dystrybucji wybranych biopaliw w Unii Europejskiej na podst. dyrektywy 2009/28/WE.

* Przewidywane wartości dla przyszłych biopaliw, które nie występowały lub występowały jedynie w niewielkich ilościach na rynku w styczniu 2008 r.

** W nawiasie podano metodę uzyskiwania energii do prowadzenia procesów technologicznych.

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 (lub procesu produkcji 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 tu jako udział gatunków występujących na danym obszarze w określonym przedziale czasu, żyjących pod wpływem stresu toksycznego PAF (ang. *Potentially Affected Fraction*) [16].

Trzeci obszar wpływu – zużycie surowców jest oceniane przez wzgląd na jakość pozostałych do wydobycia 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 przypadkach rozpatruje się także skalę wydobycia innych pierwiastków i związków.

Końcowa postać ekowskaźnika to wartość, która jest sumą wartości uzyskanych dla trzech obszarów wpływu z uwzględnieniem odpowiednich wag. Metoda Eco-indicator 99 pozwala ponadto wybrać jedną z trzech tzw. perspektyw interpretacyjnych: hierarchiczną, egalitarną lub indywidualną, które determinują wagi każdego z trzech obszarów wpływu. Jako domyślną stosuje się perspektywę hierarchiczną, w której zdrowie człowieka oraz jakość ekosystemu wpływają na wynik końcowy w udziale po 40%, zaś zużycie surowców tylko w 20%. Inaczej jest w przypadku perspektywy egalitarnej, gdzie jakość ekosystemu ma największą wagę – 50%, następnie zdrowie człowieka – 30% i surowce – 20%. W podejściu indywidualnym dominuje natomiast zdrowie człowieka z wagą 55%, potem jakość ekosystemu – 25% i na końcu surowce – 20% [12, 16].

Na podstawie metody Eco-indicator 99 obliczono ponad 200 ekowskaźników dla najczęściej używanych materiałów i procesów. Stworzono także komputerowe bazy danych wspomagające ocenę zagrożenia środowiska w oparciu o istniejące ekowskaźniki oraz umożliwiające obliczanie wartości nowych (np. SimaPro [12]).

Nieco inne podejście reprezentuje szwajcarska metoda ekologicznego deficytu (ang. *Swiss Ecological Scarcity Method*) [11], nazywana niekiedy metodą Ecoscarcity lub UBP'06 (z niem. *Umweltbelastungspunkte*). Podobnie jak w przypadku 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 (ang. *current flow*) i możliwym maksymalnym obciążeniem wynikającym z istniejących ograniczeń legislacyjnych lub celów politycznych

– tzw. krytycznym strumieniem oddziaływania (ang. *critical flow*). Pojęcia strumieni oddziaływania nie są sformalizowane, należy zatem je oceniać jako typowy dla komercyjnego nurtu nauki Zachodu sposób barwnego i pompatycznego przedstawiania wyników uprawiania działalności intelektualnej. Można domniemywać, że tzw. strumienie oddziaływania są wielkościami fizycznymi, charakteryzującymi oddziaływanie cywilizacji na środowisko, takimi jak np. emisja 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 (ang. *eco-point*, EP) dzielony przez jednostkę charakteryzującą rozpatrywane oddziaływanie na środowisko (w przypadku emisji gazów cieplarnianych jest to EP/g). Wskaźnik *eco-factor* oblicza się według wzoru [11]:

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

gdzie:

K – współczynnik względnej szkodliwości oddziaływania,

F – aktualny strumień oddziaływania,

F_n – znormalizowany strumień oddziaływania,

F_k – 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 konsumpcji 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 kraju. 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 wyznaczone jedynie dla substancji, dla których istnieją wspomniane limity prawne lub cele polityczne.

3. Przykład analizy emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia pojazdu samochodowego

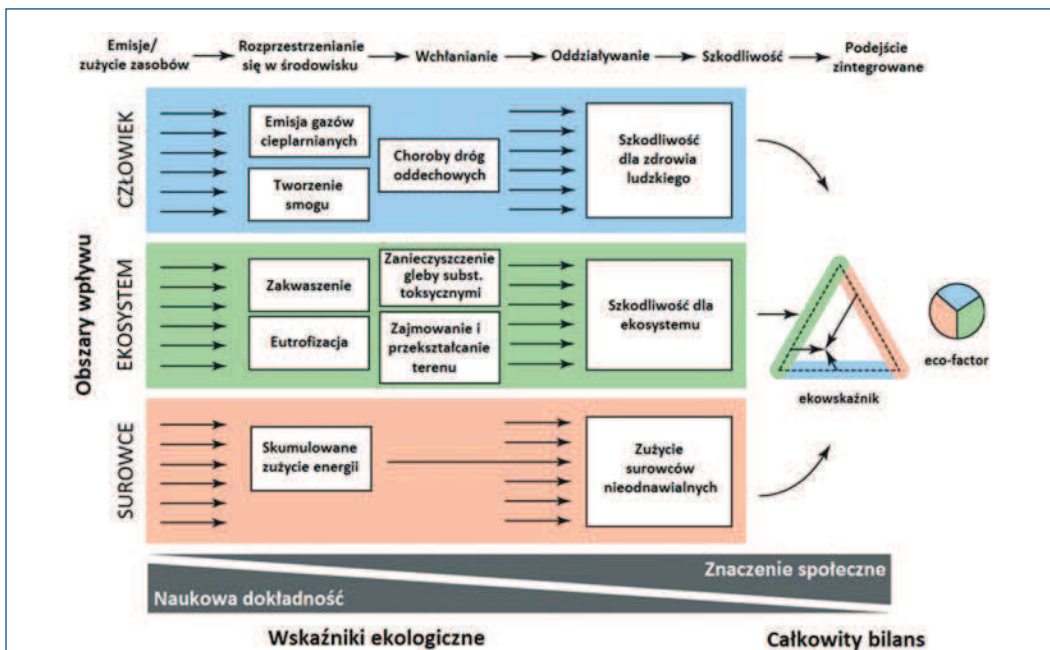
Należy podkreślić, że wynik analizy przeprowadzonej metodą Well-to-Wheel silnie zależy od ustalonego przez autorów zakresu badań, w tym od liczby i wagi zastosowanych czynników, przyjętych założeń i uproszczeń, a więc powinien być rozpatrywany wyłącznie z ich uwzględnieniem. Z tego powodu wyniki analiz opublikowane w pracach [1, 3, 10, 14, 17–19] nie zawsze pozostają ze sobą w całkowitej spójności, a niekiedy nawet bywają sprzeczne. Pozycje literaturowe z ostatnich lat, w odniesieniu do starszych, uwzględniają na ogół więcej czynników pośrednich, na przykład emisję dwutlenku węgla związaną ze zmianą sposobu zagospodarowania terenów przeznaczonych pod uprawy roślin do produkcji biopaliw [2, 14, 19].

Interesujące wyniki badań z wykorzystaniem analizy Well-to-Wheel przedstawiono w pracy [19]. Porównano w niej ekologiczne właściwości paliw nieodnawialnych: benzyny silnikowej, oleju napędowego i gazu ziemnego z właściwościami 26 rodzajów biopaliw produkowanych z wykorzystaniem różnych surowców i technologii dostępnych w Szwajcarii. Analizie poddano pięć umownych procesów wchodzących w skład cyklu istnienia paliwa: uprawę roślin (jeśli występuje), produkcję, transport do stacji paliw, wykorzystanie w pojazdach oraz budowę i utrzymanie infrastruktury. W celu oceny ich oddziaływania na środowisko naturalne zaproponowano koncepcję opartą na dwóch wskaźnikach. Są to:

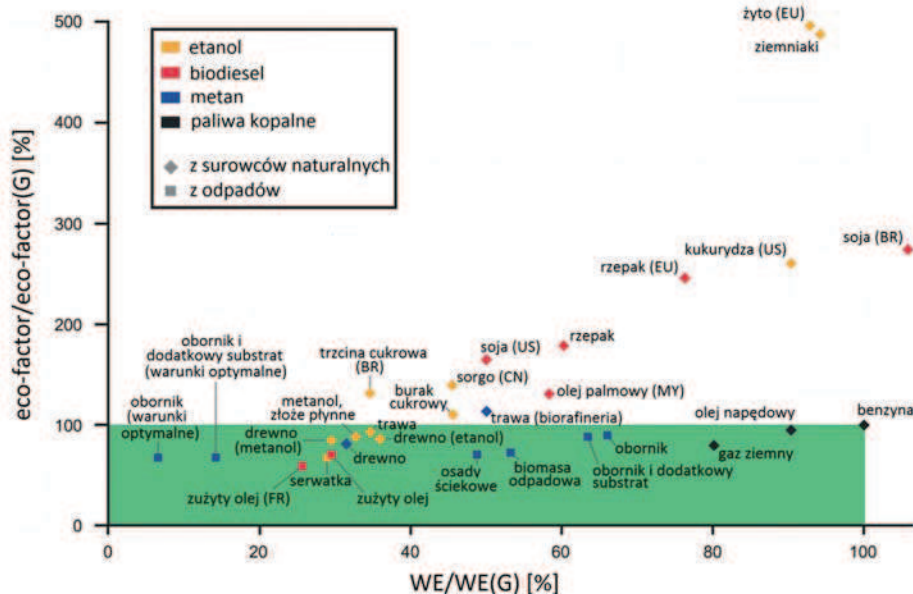
- emisja gazów cieplarnianych (w postaci ekwiwalentnej emisji dwutlenku węgla),
- całkowity bilans ekologiczny (*ökologische Gesamtbilanz*).

Wartość całkowitego bilansu ekologicznego obliczono dla każdego paliwa dwiema odmiennymi metodami – szwajcarską metodą ekologicznego deficytu (wskaźnik eco-factor) oraz metodą Eco-indicator 99 (ekowskaźnik) – rysunek 3.

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki dla wybranych biopaliw we współrzędnych: względny energetyczny wskaźnik emisji gazów cieplarnianych – względny eco-factor, odniesione do wartości dla benzyny. Analiza uzyskanych przez autorów wyników pozwala stwierdzić, że większość z rozważanych biopaliw (21 z 26) ogranicza emisję gazów cieplarnianych o więcej niż 30% w odniesieniu do emisji odpowiadających benzynom silnikowym. Z drugiej strony prawie połowa biopaliw (12 z 26) charakteryzuje się bardziej szkodliwym oddziaływaniem na środowisko naturalne niż paliwa kopalne. W grupie tej znajdują się biopaliwa produkowane obecnie na największą skalę, tj. bioetanol z kukurydzy (Stany Zjednoczone Ameryki), biodiesel z soi i bioetanol z trzciny cukrowej (Brazylia) oraz biodiesel z oleju palmowego (Malezja). Znacznie lepsze właściwości ekologiczne wykazują biopaliwa wytwarzane z biomasy odpadowej, np. ze zużytego oleju roślinnego, oraz etanol z drewna lub trawy. Uzyskane wyniki uwydatniają różnice pomiędzy korzyściami i stratami związanymi z zastosowaniem poszczególnych biopaliw [14, 19].



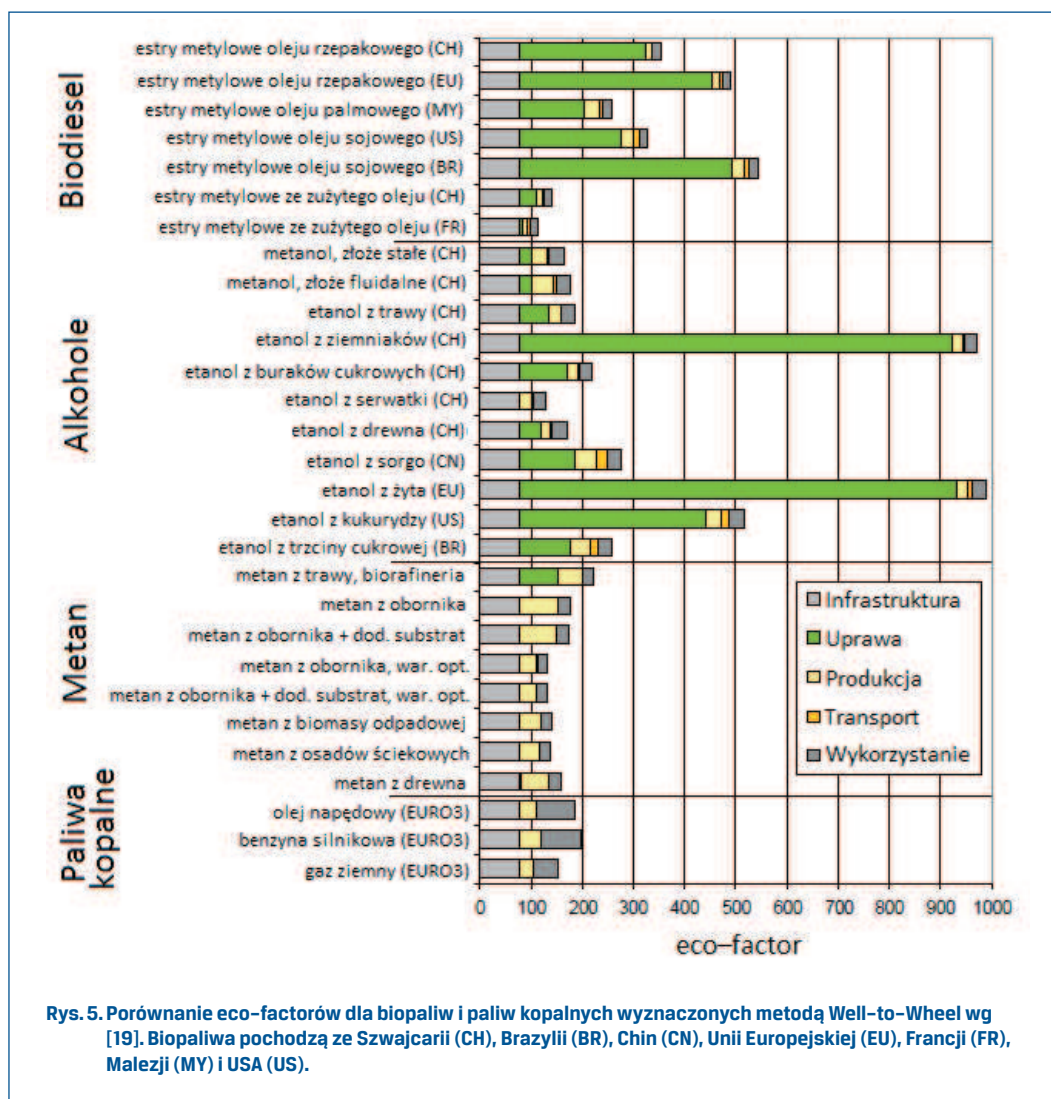
Rys. 3. Schemat wyznaczania całkowitego bilansu ekologicznego wg [19].



Rys. 4. Zestawienie względnych energetycznych wskaźników emisji gazów cieplarnianych oraz eco-factorów, odniesionych do wartości dla benzyny (G), dla 29 paliw produkowanych z wykorzystaniem różnych substratów wg [19]. Biopaliwa są pochodzenia szwajcarskiego, chyba że zaznaczono inaczej: Brazylia (BR), Chiny (CN), Unia Europejska (EU), Francja (FR), Malezja (MY), USA (US).

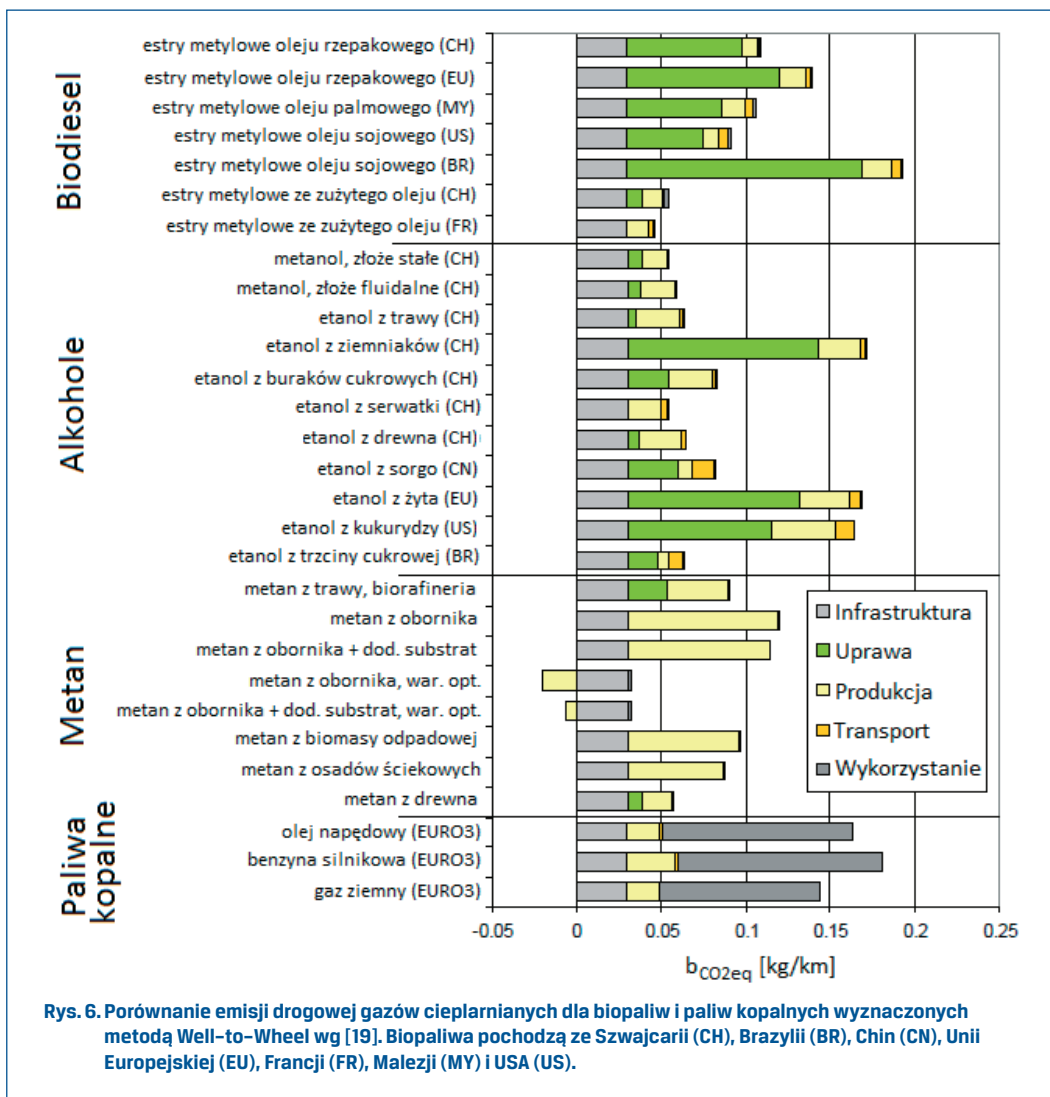
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono emisję drogową gazów cieplarnianych i eco-factor dla kolejnych procesów wchodzących w skład cyklu istnienia rozważanych paliw. Zasadniczo największe wartości obydwu wskaźników (choć nie dla wszystkich paliw) występują podczas uprawy roślin, ze względu na użycie maszyn rolniczych, nawozów i pestycydów oraz innych czynników, takich jak: zakwaszenie gleby i utrata bioróżnorodności terenów, szczególnie w strefach tropikalnych. Proces produkcji jest drugim co do wielkości źródłem emisji gazów cieplarnianych, zaś transport paliwa do szwajcarskich stacji paliw przyczynia się w niewielkim stopniu (mniej niż 10%) do powstawania emisji i innych zagrożeń środowiska [14, 19].

Zaprezentowane wyniki analizy można uznać za atrakcyjne, gdyż obejmują szeroki zakres



Rys. 5. Porównanie eco-factorów dla biopaliw i paliw kopalnych wyznaczonych metodą Well-to-Wheel wg [19]. Biopaliwa pochodzą ze Szwajcarii (CH), Brazylii (BR), Chin (CN), Unii Europejskiej (EU), Francji (FR), Malezji (MY) i USA (US).

danych wejściowych i wiele rodzajów paliw. Mimo to zastosowana metoda nie jest doskonała. Próba łączenia różnych zagrożeń ekologicznych w jeden wskaźnik niesie ze sobą duże ryzyko, choć z drugiej strony obydwie zastosowane metody (ekologicznego deficytu i Eco-indicator 99) dały jednakowe wyniki. Znacznie większe wątpliwości wzbudza natomiast pominięcie potencjalnych efektów pośrednich związanych z rynkiem biopaliw, np. zależności między wzrostem zapotrzebowania na biopaliwa i powiększaniem terenów pod uprawy roślin energetycznych kosztem naturalnych ekosystemów oraz czynników ekonomicznych i społecznych. Poza tym, z powodu niekompletnych danych, autorzy nie uwzględnili w analizie niektórych biopaliw produkowanych z surowców ligninocelulozowych nieprzydatnych w przemyśle spożywczym [14, 19].



Rys. 6. Porównanie emisji drogowej gazów cieplarnianych dla biopaliw i paliw kopalnych wyznaczonych metodą Well-to-Wheel wg [19]. Biopaliwa pochodzą ze Szwajcarii (CH), Brazylii (BR), Chin (CN), Unii Europejskiej (EU), Francji (FR), Malezji (MY) i USA (US).

4. Podsumowanie

Dotychczas najbardziej rozpowszechnione metody kompleksowej oceny ekologicznej motoryzacji ograniczają się przede wszystkim do analizy energetycznej i analizy emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych z uwzględnieniem etapów wytwarzania i dystrybucji nośników energii i użytkowania samochodów. Wiedza na temat sposobów oceny właściwości ekonomicznych ze względu na zużycie paliwa oraz ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń w czasie użytkowania pojazdów jest dużo bogatsza niż w wypadku etapu przygotowywania paliw, mimo że i w wypadku użytkowania pojazdów pozostaje wiele trudnych do ujednoczenia uwarunkowań, determinujących wyniki oceny. Najważniejsze niepewności są związane z identyfikacją warunków pracy silników spalinowych, mających wpływ na stany pracy silników, determinujące szczególnie silnie emisję zanieczyszczeń. W porównaniu jednak z tymi problemami wrażliwość właściwości ekologicznych i energetycznych procesów wytwarzania nośników energii na rozpatrywane nośniki i sposoby ich wytwarzania jest nieporównywalnie większa. Uzasadnia to celowość rozpatrywania wyników analiz nie tylko w postaci łącznej, ale i osobno, w wielu wypadkach bowiem w procesach produkcji i dystrybucji nośników energii mogą się mieścić znaczne rezerwy, podczas gdy na etapie użytkowania pojazdów możliwości zmian są zazwyczaj niewielkie. Wynika z tego, że możliwe korzyści na etapie użytkowania pojazdów są znacznie bardziej pożyteczne niż na etapie dostarczania nośników energii.

Drugi poważny problem to sposób traktowania zanieczyszczeń. W powszechnie przyjętej modzie jako najważniejsze zanieczyszczenia, utożsamiane niejednokrotnie z właściwościami ekologicznymi, traktuje się gazy cieplarniane, a zazwyczaj wręcz tylko dwutlenek węgla, często zapominając, że w wypadku wykorzystywanych odnawialnych nośników energii powinno się to odnosić jedynie do dwutlenku węgla kopalnego. Jest to podejście nie tylko niesłuszne, ale i szkodliwe, najbardziej groźne są bowiem dla ludzi substancje szkodliwe dla ich zdrowia w sposób bezpośredni. Spotyka się sposoby tworzenia metod oceny kompleksowej z uwzględnianiem emisji substancji szkodliwych dla zdrowia ludzi i sprzyjających intensyfikacji zjawiska cieplarnianego. Przykładem takiego podejścia wydaje się być propozycja zawarta w dyrektywie 2009/33/WE w sprawie promowania ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów. W rzeczywistości w dyrektywie tej nie rozróżnia się dwutlenku węgla kopalnego i dwutlenku węgla niekopalnego, co stawia w sytuacji przegranej stosowanie paliw odnawialnych. Słuszne jest zatem odrębne stosowanie wskaźników dotyczących emisji samych substancji szkodliwych dla zdrowia ludzi i odrębne wskaźników dotyczących emisji substancji szkodliwych dla środowiska. Ze względów humanistycznych priorytetowymi w ocenach kompleksowych motoryzacji powinny być zatem wskaźniki dotyczące emisji substancji szkodliwych dla zdrowia ludzi w etapie użytkowania pojazdów, bo charakteryzują one najgroźniejsze i bezpośrednie niebezpieczeństwo dla ludzi w związku z motoryzacją.

Autorzy proponują zatem następującą systematykę wskaźników do kompleksowej oceny bilansu energetycznego i emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych na etapie wytwarzania i dystrybucji nośników energii (etap WtT) oraz użytkowania pojazdów (etap TtW):

- wskaźniki charakteryzujące emisję substancji szkodliwych dla zdrowia w etapie WtT, oznaczone jako: emisja drogowa $b_{tox\ WtT}$ energetyczny wskaźnik emisji $WE_{tox\ WtT}$
- wskaźniki charakteryzujące emisję substancji szkodliwych dla środowiska w etapie WtT, oznaczone jako: emisja drogowa $b_{eco\ WtT}$ energetyczny wskaźnik emisji $WE_{eco\ WtT}$
- wskaźniki charakteryzujące efekt energetyczny w etapie WtT, oznaczony jako sprawność η_{WtT}
- wskaźniki charakteryzujące emisję substancji szkodliwych dla zdrowia w etapie TtW, oznaczone jako: emisja drogowa $b_{tox\ TtW}$ energetyczny wskaźnik emisji $WE_{tox\ TtW}$
- wskaźniki charakteryzujące emisję substancji szkodliwych dla środowiska w etapie TtW, oznaczone jako: emisja drogowa $b_{eco\ TtW}$ energetyczny wskaźnik emisji $WE_{eco\ TtW}$
- wskaźniki charakteryzujące efekt energetyczny w etapie TtW, oznaczony jako sprawność η_{TtW}

Jako priorytetowy w kompleksowej ocenie ekologicznej motoryzacji należy uznać wskaźnik charakteryzujący emisję substancji szkodliwych dla zdrowia w etapie TtW, tzn. użytkowania pojazdów samochodowych.

Autorzy są przekonani, że rozważa decyzyjnych przedstawicieli społeczeństw przychyli się do racjonalnego traktowania spraw ochrony środowiska przed skutkami motoryzacji i że kompleksowa ocena szkodliwości motoryzacji będzie pomocna w tym przedsięwzięciu.

Literatura

- [1] AHLVIK P., BRANDBERG Å.: *Well-to-Wheel efficiency for alternative fuels from natural gas or biomass*. A report for the Swedish National Road Administration, EcoTraffic, 2001.
- [2] BARNETT M. O.: *Biofuels and greenhouse gas emissions: green or red?* Environmental Science & Technology, 44, 2010, ss. 5330–5331.
- [3] BRINKMAN N., WANG M., WEBER T., DARLINGTON T.: *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions*. May, 2005.
- [4] CHŁOPEK Z., Gis W., Waśkiewicz J.: *Zastosowanie biogazu do zasilania silników autobusów miejskich*. Rozdział w monografii „Energia niekonwencjonalne i zagospodarowanie odpadów”. Lublin 2010, ss.103–116.
- [5] CHŁOPEK Z.: *Bilansowanie emisji zanieczyszczeń z silników autobusów miejskich*. Transport Samochodowy 3/2009, ss. 55–70.
- [6] CHŁOPEK Z.: *Ekologiczne i ekonomiczne aspekty eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym na paliwo bioetanolowe*. Transport Samochodowy 2/2008, ss. 37–50.
- [7] CHŁOPEK Z.: *Pojazdy samochodowe. Ochrona środowiska naturalnego*. WKŁ, Warszawa 2002.
- [8] CHŁOPEK Z.: *Zastosowanie biopaliw w transporcie*. Konferencja Naukowa „Transport 2008”. Lublin, 7 marca 2008 r.
- [9] *Energy Independence Now: How do Hydrogen Fuel Cell Vehicles Compare in Terms of Emissions and Energy Use? A Well-to-Wheel Analysis*.

-
- [10] EPA *Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Renewable Fuels*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2010.
- [11] FRISCHKNECHT R., STEINER R., BRAUNSCHWEIG A., EGLI N., HILDESHEIMER G.: *Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006*. <http://www.esu-services.ch/download/Frischknecht-2006-EcologicalScarcity-Paper.pdf>
- [12] <http://www.pre.nl/eco-indicator99/>
- [13] *Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne*. Informator techniczny BOSCH. WKŁ, Warszawa 2010.
- [14] SCHARLEMANN J. P. W., LAURANCE W. F.: *How Green Are Biofuels?* Science, 319, 2008, ss. 43-44.
- [15] SITNIK L. J.: *Ekopaliwa silnikowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [16] *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. Methodology Report. Pre Consultants B. V. Amersfoort, 2001.
- [17] UNNASCH, S.: *Alcohol Fuels from Biomass: Well-to-Wheel Energy Balance*. Proceedings of the 15th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF), San Diego, California, United States, 26-28 September 2005.
- [18] *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. WELL-to-WHEELS Report, Version 2c. EUCAR/CONCAWE/JRC, March 2007.
- [19] ZAH R., BÖNI H., GAUCH M., HISCHIER R., LEHMANN M., WÄGER P.: *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. EMPA, St. Gallen, Switzerland, 2007.