



**Politechnika
Śląska**

Poszerzone Streszczenie

Rozprawa doktorska w dyscyplinie
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Economic and environmental analysis of applying ammonia as carbon
free fuel in internal combustion engine driven agricultural vehicle
performed in whole life cycle approach

Mateusz Proniewicz

Politechnika Śląska
Gliwice, Polska, 2025

Autor:

mgr inż. Mateusz Proniewicz

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

e-mail: mateusz.proniewicz@polsl.pl

Promotor:

prof. dr hab. inż. Andrzej Szlęk

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

e-mail: andrzej.szlek@polsl.pl

Promotor pomocniczy:

dr inż. Karolina Petela

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

e-mail: karolina.petela@polsl.pl

Rozdział 1 – Wstęp

Zużycie energii jest jednym z filarów rozwoju cywilizacji. Globalne bezpośrednie zużycie energii pierwotnej stale rośnie, z 27 972 TWh w 1950 roku do 167 584 TWh w 2024 roku. Energia ta jest dostarczana głównie z paliw kopalnych: gaz, ropa i węgiel stanowiły 72% światowej bezpośredniej energii pierwotnej w 1950 roku, a w 2024 roku wzrosły do 85% [1]. Jednak intensywna eksploatacja paliw kopalnych wiąże się z emisją gazów cieplarnianych (greenhouse gases – GHG), które oddziałują na klimat. W tym kontekście wodór zyskał na znaczeniu jako wszechstronny nośnik energii, który może zastąpić istniejące paliwa. Charakteryzuje się wysoką wartością opałową (lower heating value – LHV) w ujęciu masowym (2,4 razy wyższą niż metan [2]), brakiem emisji dwutlenku węgla podczas spalania oraz odnawialnym charakterem w przypadku jego produkcji przez elektrolizę wody z użyciem odnawialnej energii elektrycznej [3]. Jednak w zastosowaniach mobilnych trudność stanowi jego efektywne magazynowanie: wodór może być przechowywany w stanie ciekłym w niskich temperaturach (temperatura nasycenia około $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy 1 barze [4]) lub jako gaz pod wysokim ciśnieniem (700 barów) [5]. Z tej perspektywy amoniak jawi się jako obiecująca alternatywa. Podobnie jak wodór, jego cząsteczka nie zawiera atomów węgla, dlatego jego spalanie nie emituje dwutlenku węgla. Jest produkowany głównie w procesie Habera–Boscha [14] poprzez reakcję wodoru z azotem; ponieważ azot jest separowany z powietrza, amoniak można zaklasyfikować jako odnawialny, jeśli do jego produkcji stosuje się odnawialny wodór. Temperatura nasycenia amoniaku wynosi około $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy 1 barze [6], zatem jego magazynowanie jest znacznie łatwiejsze niż magazynowanie wodoru; po sprężeniu do 20 barów pozostaje ciekły do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Z perspektywy silnika spalinowego (internal combustion engine – ICE), chociaż wartość opałowa amoniaku wyrażona na kilogram paliwa wynosi około 44% wartości oleju napędowego [8], niższy stosunek stechiometryczny powietrza do paliwa skutkuje podobną zawartością energii na kilogram stechiometrycznej mieszanki paliwowo-powietrznej (2,64 vs 2,77 MJ/kg-mieszaniny) [8]. W związku z tym przy tej samej ilości powietrza dostarczanej do silnika, porównywalną ilość energii można dostarczyć za pomocą amoniaku jak i oleju napędowego.

Taka zmiana paliwa rodzi pytania o jej środowiskowe i ekonomiczne konsekwencje z perspektywy cyklu życia. Gdyby silnik był zasilany czystym amoniakiem, podczas jego pracy nie powstawałyby emisje dwutlenku węgla. Jednak z uwagi na to, że amoniak charakteryzuje się niższą wartością opałową niż olej napędowy, konieczne jest zużycie większej ilości amoniaku, aby uzyskać ten sam efekt podczas pracy silnika. Jeśli produkcja amoniaku miałaby duży wpływ na środowisko z powodu intensywnego wykorzystania energii oraz materiałów, skutkując znacznymi emisjami gazów cieplarnianych, korzyści z redukcji emisji gazów cieplarnianych pochodzących z eksploatacji pojazdu mogły zostać zrównane lub nawet przekroczone przez emisje związane z produkcją amoniaku. Kolejnym aspektem jest to, iż ze względu na trudności w spalaniu czystego amoniaku, w ramach pracy rozważano układ dwupaliwowy w celu osiągnięcia stabilnej pracy

silnika, zgodnie z rekomendacjami literaturowymi [9], w którym biodiesel służył jako paliwo pilotażowe. Szczegółowa analiza emisji silnika z uwzględnieniem pracy w trybie dwupaliwowym przy zmiennym obciążeniu jest niezbędna do pełnego zrozumienia konsekwencji zmiany paliwa. Z uwagi na to, że spalanie amoniaku może prowadzić, między innymi, do emisji podtlenku azotu (N_2O) [10], [11], czyli silnego gazu cieplarnianego o GWP (Global Warming Potential) wynoszącym 273 [12], należy to uwzględnić. Finalnym aspektem zmiany paliwa jest ekonomiczne porównanie obu opcji, konkretnie porównanie nakładów potrzebnych na zakup i eksploatację pojazdu napędzanego dieslem lub amoniakiem, uwzględniając w analizie to, że koszt amoniaku zależy od źródła wodoru.

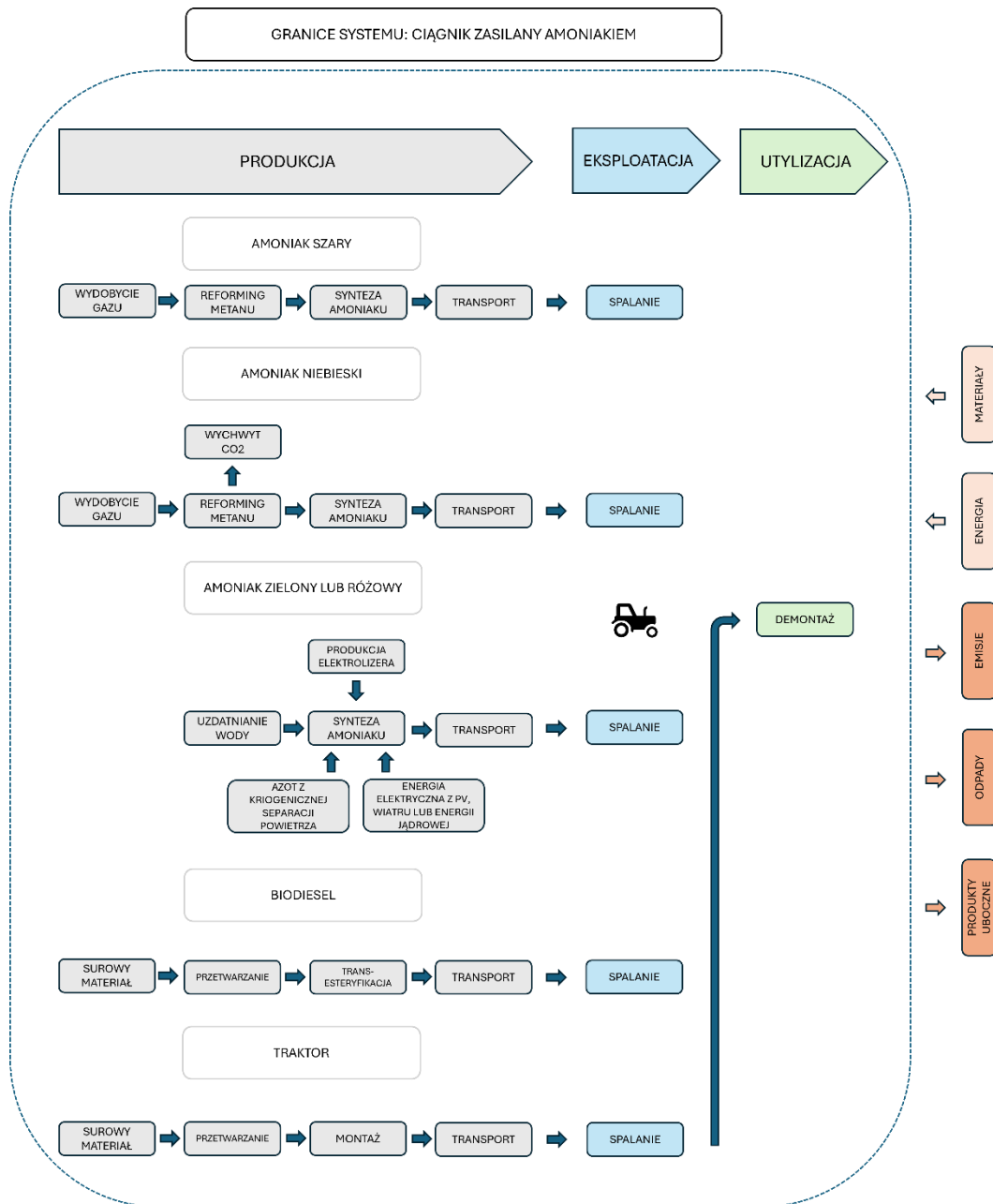
Nakreślone zagadnienia badawcze można sformułować jako konkretne cele pracy w następujący sposób:

1. Określenie różnic między wpływem na środowisko mini ciągnika napędzanego amoniakiem i olejem napędowym w oparciu o analizę cyklu życia (life cycle assessment – LCA).
2. Ocena wyników ekonomicznych mini ciągnika napędzanego amoniakiem i olejem napędowym przy użyciu rachunku kosztów cyklu życia (life cycle costing – LCC).

Analiza cyklu życia (LCA) oraz rachunek kosztów cyklu życia (LCC) określają odpowiednio wpływ na środowisko i całkowite koszty danego produktu lub aktywa przez cały okres jego żywotności, tj. od produkcji/zakupu przez eksploatację z konserwacją aż do utylizacji (end of life – EoL) [13], [14]. Jako jednostkę funkcjonalną wybrano hektar-rok eksploatacji traktora. LCA wykonywano za pomocą oprogramowania LCA for Experts (dawniej GaBi). W przypadku LCA dotyczącego traktora zasilanego amoniakiem, etap produkcji paliwa obejmuje pełną ścieżkę produkcji amoniaku w kilku scenariuszach, od wariantów opartych na paliwach kopalnych po odnawialne, natomiast etap eksploatacji traktora odzwierciedla emisje uzyskane w wyniku eksperymentalnych pomiarów silnika zasilanego amoniakiem. Granice układu przedstawiono na Rysunek 1. W przypadku LCA dotyczącego traktora zasilanego olejem napędowym, produkcja paliwa dotyczy diesla, a emisje opierają się na eksperymentach na silniku napędzanym olejem napędowym. Takie same założenia stosuje się do szacowania wpływu produkcji i utylizacji (EoL) mini traktora na środowisko w obu przypadkach zasilania.

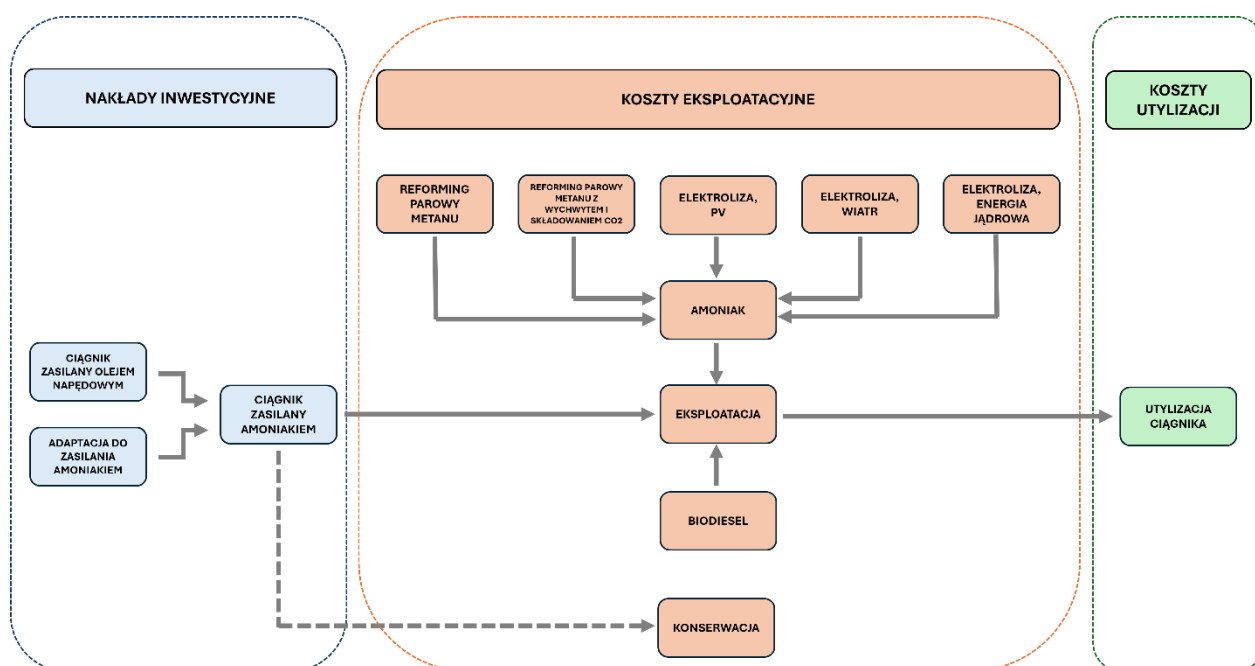
Inwentaryzacja cyklu życia opiera się na pierwotnych danych eksperymentalnych dla fazy operacyjnej pojazdu oraz danych wtórnych dla pozostałych faz. Dane wtórne pochodzą z bazy danych Managed LCA Content firmy Sphera [15] oraz literatury; baza danych opiera się na danych branżowych, a jej wiarygodność jest gwarantowana przez niezależną weryfikację. Ocena wpływu na środowisko oparta jest na wybranych kategoriach środowiskowych w ramach metody ReCiPe (kategorie pośrednie: zmiana klimatu, wyczerpywanie zasobów kopalnych i zużycie wody

słodkiej; dwie kategorie końcowe: zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu). Chociaż LCA jest znormalizowana na poziomie ramowym, jej zastosowanie w niniejszym badaniu obejmowało szereg oryginalnych dokonań, takich jak zdefiniowanie granic systemu i scenariusza pracy ciągnika w sadzie oraz utworzenie spójnych zbiorów danych cyklu życia poprzez zebranie i przetworzenie pierwotnych danych eksperymentalnych dotyczących silnika zasilanego amoniakiem lub olejem napędowym oraz agregację danych wtórnych dotyczących ścieżek produkcji paliwa i pozostałych faz cyklu życia.



Rysunek 1. Granice układu LCA mini traktora zasilanego amoniakiem.

Struktura rachunku kosztów cyklu życia (LCC) jest spójna z podejściem do LCA; granice systemu LCC przedstawiono na Rysunek 2. W przypadku mini traktora zasilanego amoniakiem, nakłady inwestycyjne na zakup traktora odpowiadają cenie mini traktora z silnikiem wysokoprężnym dodatkowo wyposażonego w pośredni system wtrysku amoniaku do kolektora dolotowego, przy czym paliwo pilotażowe wykorzystuje istniejący system wtrysku bezpośredniego, w którym biodiesel zastępuje diesel. W przypadku analizy LCC dotyczącej zasilania dieslem, nakłady inwestycyjne na zakup traktora określone są na podstawie jego ceny rynkowej. Faza eksploatacji obejmuje koszty związane ze zużyciem paliwa – uwzględniając amoniak pochodzący zarówno ze źródeł konwencjonalnych, jak i odnawialnych dla przypadku zasilania amoniakiem – a także konserwację pojazdu. Utylizacja traktora odnosi się do kosztów utylizacji nadwozia pojazdu.



Rysunek 2. Granice systemu LCC mini traktora zasilanego amoniakiem.

W rozdziale drugim omawiany jest wpływ na środowisko wybranych metod produkcji amoniaku poprzez dedykowaną analizę LCA; rozdział trzeci dotyczy wyników badań eksperymentalnych silnika. W rozdziale czwartym przedstawiono pełną analizę LCA mini traktora zasilanego amoniakiem w porównaniu z dieslem (paliwem referencyjnym), opartą na wynikach z rozdziałów drugiego i trzeciego, realizującą pierwszy cel pracy. W rozdziale piątym zaprezentowano porównanie LCC między mini traktorem napędzanym amoniakiem a mini traktorem napędzanym olejem napędowym, odwołujące się do drugiego celu pracy, a w rozdziale szóstym przedstawione jest podsumowanie wraz z najważniejszymi wnioskami płynącymi z przeprowadzonych badań.

Rozdział 2 – Wybrane metody produkcji amoniaku

Podstawową przemysłową metodą produkcji amoniaku jest proces Habera–Boscha, rozpowszechniony dzięki jego dojrzałości technologicznej i skalowalności [16], [17], który wykorzystany jest w niniejszej analizie jako metoda syntezy amoniaku. Proces oparty jest na egzotermicznej reakcji azotu z wodorem. Z uwagi na to, iż azot pozyskiwany jest z powietrza atmosferycznego, źródło wodoru determinuje rodzaj amoniaku, zgodnie z następującymi oznaczeniami:

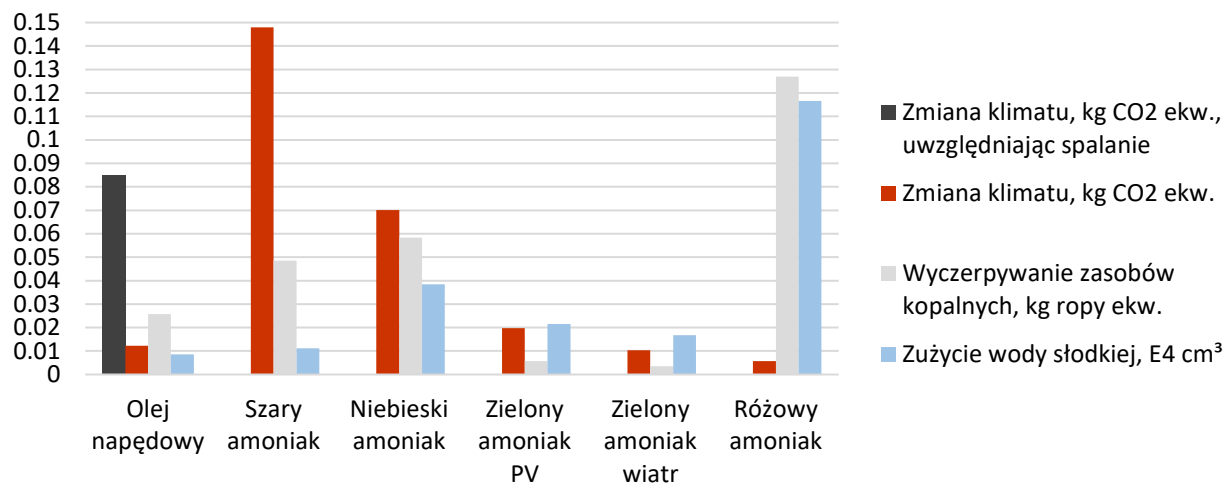
- i. Szary amoniak – wodór pochodzący z reformingu parowego metanu (steam methane reforming – SMR)
- ii. Niebieski amoniak – wodór pochodzący z SMR z wychwytywaniem i magazynowaniem dwutlenku węgla (CCS – carbon capture and storage)
- iii. Zielony amoniak – wodór pochodzący z elektrolizy wody zasilanej przez fotowoltaikę lub wiatr
- iv. Różowy amoniak – wodór pochodzący z elektrolizy wody zasilanej energią jądrową

W celu oceny wpływu na środowisko stosowania amoniaku jako paliwa, przeprowadzono analizę LCA w granicach od pozyskania surowców do etapu wyjścia z zakładu (od ekstrakcji surowców do produkcji amoniaku) z jednostką funkcjonalną 1 MJ (LHV). Wpływ amoniaku szarego i niebieskiego na środowisko oszacowano bezpośrednio na podstawie zagregowanych procesów dostępnych w ramach bazy danych z oprogramowania służącego do przeprowadzenia analizy. Zielony amoniak został modelowany niezależnie, zakładając elektrolizer alkaliczny jako najbardziej reprezentatywny rodzaj (60% zainstalowanej mocy w 2023 roku) [10], z modelem procesu elektrolizy opartym na literaturze oraz procesami poprzedzającymi (upstream) z bazy oprogramowania. Oceniane są trzy przypadki produkcji energii elektrycznej – PV i wiatr (zielony amoniak) oraz jądrowy (różowy amoniak) – z identycznymi parametrami procesowymi. Z uwagi na to, iż amoniak jest porównywany z olejem napędowym jako paliwo, produkcja oleju napędowego została uwzględniona jako punkt odniesienia.

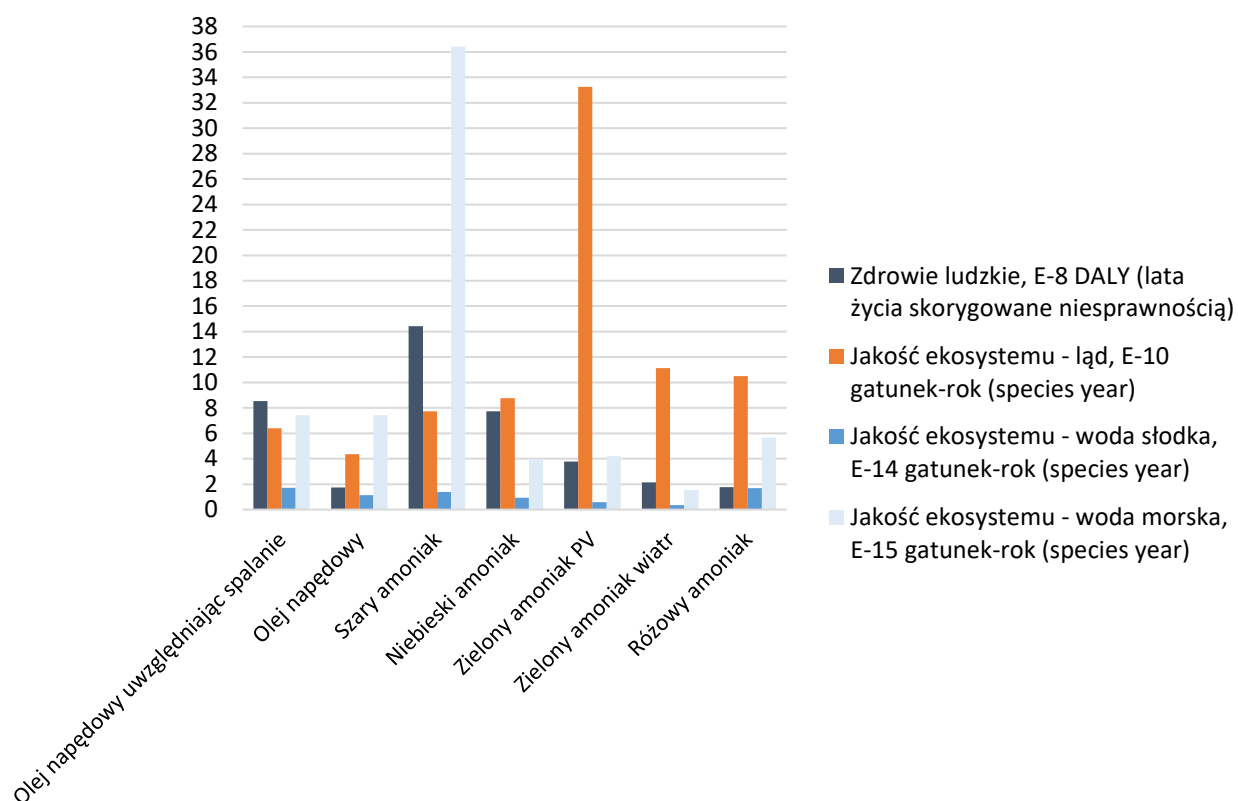
Na Rysunek 3 porównano pięć metod produkcji amoniaku z olejem napędowym w odniesieniu do trzech kategorii pośrednich na znormalizowanej skali. W kategorii zmiany klimatu, ranking metod produkcji amoniaku jest następujący: szary, niebieski, zielony oparty o PV, zielony oparty o wiatr, różowy. W porównaniu do samej produkcji diesla, jedynie zielony amoniak oparty o wiatr i różowy osiągają niższe wpływy (wpływ różowego amoniaku to około połowy diesla). Z uwagi na fakt, że jednostka funkcjonalna wynosi 1 MJ (LHV), sama produkcja diesla skutkuje stosunkowo niewielkim wpływem – do dostarczenia 1 MJ potrzebna jest mniejsza ilość diesla niż do dostarczenia 1 MJ z amoniaku. Jednak dominującym czynnikiem wpływającym na klimat przy rozpatrywaniu silników spalinowych jest spalanie paliwa – dodany został zatem scenariusz

uwzględniający stechiometryczną emisję CO₂. Szary amoniak jest jedyną metodą, której wpływ przekracza tę wartość, co potwierdza, iż amoniak na bazie SMR nie jest dobrym rozwiązaniem ze środowiskowego punktu widzenia; niebieski amoniak osiąga niższą wartość wpływu, jednak nadal znaczącą, ponieważ wychwyt CO₂ obejmuje jedynie część emisji. Zielony i różowy amoniak można ocenić jako preferowane źródła, przy czym amoniak oparty o PV jest najmniej korzystny z trzech przypadków zasilania energią elektryczną. W kategorii wyczerpywania się zasobów kopalnych obie zielone metody osiągają najniższy wpływ; diesel, szary i niebieski amoniak znajdują się na poziomach pośrednich, natomiast różowy skutkuje najwyższym wpływem. Zużycie wody słodkiej jest największe w przypadku energii jądrowej (różowy amoniak), natomiast najniższe w przypadku oleju napędowego.

Rysunek 4 przedstawia wyniki kategorii końcowych: zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu (lądowego, słodkowodnego i morskiego) w normalizowanej skali. Wyniki dla kategorii zdrowie ludzkie w dużej mierze podążają za wzorcem zmian klimatycznych: najniższy wpływ osiąga amoniak różowy, następnie zielony oparty na energii wiatrowej i zielony oparty na PV; sama produkcja oleju napędowego również skutkuje niskim wpływem, który wzrasta, gdy uwzględni się spalanie oleju; najwyższy poziom generuje amoniak szary, a niebieski plasuje się pomiędzy nimi. Jakość ekosystemu zależy głównie od czynnika lądowego. Największy wpływ na środowisko w tej kategorii osiąga zielony amoniak oparty o PV, co odzwierciedla materiałochłonny charakter produkcji paneli fotowoltaicznych i przetwarzania zużytych elementów, podczas gdy amoniak zielony oparty o wiatr, różowy, niebieski i szary plasują się na podobnym, niższym poziomie, natomiast najniższy wpływ dotyczy oleju napędowego. Różnice są niewielkie, z wyjątkiem amoniaku opartego o PV. W kategorii jakość ekosystemu – woda słodka rozrzut jest niewielki: najwyższy wpływ osiąga olej napędowy uwzględniając jego spalanie, a najniższy – zielony amoniak oparty na energii wiatrowej. Dla kategorii jakość ekosystemu – woda morska najwyższy wpływ osiąga się dla szarego amoniaku; olej napędowy wraz z jego spalaniem plasuje się na drugim miejscu z około pięciokrotnie niższym wpływem, a zielony amoniak oparty na energii wiatrowej wykazuje najniższy wpływ.



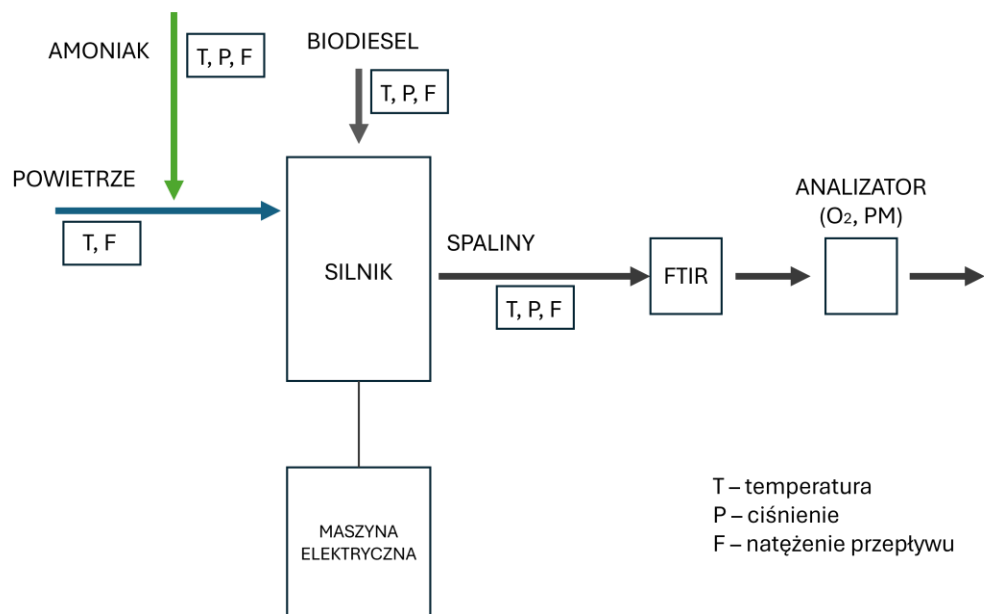
Rysunek 3. Wyniki kategorii pośrednich dla wybranych metod produkcji amoniaku.



Rysunek 4. Wyniki kategorii końcowych dla wybranych metod produkcji amoniaku.

Rozdział 3 – Osiągi silnika zasilanego amoniakiem i dieslem

Eksperymenty przeprowadzono na jednocylindrowym silniku Lifan C186F spotykanym w mini traktorach. Amoniak był dostarczany do silnika poprzez jego wtrysk w fazie gazowej do kolektora dolotowego, gdzie następowało zmieszanie z powietrzem, natomiast biodiesel był wtryskiwany bezpośrednio jako paliwo pilotażowe. Schemat stanowiska badawczego pokazano na Rysunek 5. Natężenie przepływu masowego amoniaku zmierzono przy użyciu przepływomierza Coriolisa, natomiast objętościowy strumień powietrza przy użyciu przepływomierza turbinowego. Temperatury powietrza, paliwa i spalin rejestrowano termoparami. Moment i prędkość obrotową wału kontrolowano za pomocą maszyny elektrycznej pracującej jako hamulec. Wszystkie sygnały były rejestrowane i kontrolowane w ramach oprogramowania LabVIEW. Mokry skład spalin mierzono za pomocą FTIR (Gasmeter DX4000), z dodatkowym pomiarem tlenu (CAPELEC CAP 3201) oraz weryfikacją poziomu PM10 (SMG200 M). Zarejestrowane zmienne obejmowały zużycie paliwa oraz stężenia CO₂, CO, CH₄, NO_x, NH₃, SO₂, PM10 oraz innych gazów w spalinach. Najważniejsze parametry silnika oraz elementarny skład paliw wraz z LHV są podane w Tabela 1.



Rysunek 5. Schemat stanowiska badawczego wykorzystanego w eksperymentach.

Tabela 1. Główne parametry silnika oraz elementarny skład paliw.

Silnik	Model: LIFAN C186F, 4-suwowy, 1-cylindrowy, chłodzony powietrzem Pojemność: 418 cm ³
--------	--

	Stopień sprężania: 16,5:1 Maksymalna moc teoretyczna: 6,4 kW
Olej napędowy	C = 0,8078, H = 0,1556, O = 0,0363, N = 0,0003 LHV = 42,4 MJ/kg
Biodiesel	C = 0,7533, H = 0,1397, O = 0,1070, N = 0,0000 LHV = 37,4 MJ/kg
Amoniak	C = 0,0000, H = 0,1760, O = 0,0000, N = 0,8240 LHV = 18,6 MJ/kg

Testy obejmowały następujące prędkości wału: 2700, 2400, 2100, 1800, 1500 i 1200 obr./min. Przy 2700 obr./min zastosowano momenty obrotowe 12, 8 i 4 Nm; przy pozostałych prędkościach zastosowano momenty 17, 12, 8 i 4 Nm. Dla silnika zasilanego amoniakiem, strumień biodiesla został ustalony na minimalnej wartości przepływu zapewniającej stabilną pracę silnika (odpowiadającą momentowi obrotowemu 4 Nm), a przepływ NH_3 był dostosowywany tak, aby spowodować wzrost momentu obrotowego. Punkt pracy 2700 obr./min / 12 Nm został wyznaczony jako górna granica pracy silnika zasilanego amoniakiem. Zużycie paliwa oraz emisje gazów cieplarnianych wyrażone jako ekwiwalent CO_2 – uwzględniając CO_2 (GWP = 1), CH_4 (GWP = 27) i N_2O (GWP = 273) – dla silnika zasilanego amoniakiem oraz olejem napędowym przedstawiono w Tabeli 2. Z uwagi na stosunkowo wysokie emisje podtlenku azotu w niektórych punktach pracy silnika, dla takich warunków całkowita emisja gazów cieplarnianych dla silnika zasilanego amoniakiem przewyższa emisje dla silnika zasilanego olejem napędowym (np. 2700 obr./min przy wszystkich obciążeniach, 2400 obr./min przy 12 i 8 Nm). Wyniki pokazują, że to, czy zmiana paliwa spełnia swój podstawowy cel dekarbonizacji, w dużym stopniu zależy od warunków pracy silnika.

Tabela 2. Porównanie zużycia paliwa i emisji gazów cieplarnianych dla silnika zasilanego amoniakiem oraz dieslem (D = diesel, A = amoniak).

Obroty na minutę, 1/min	Moment obrotowy, Nm	Diesel (D), g/s	Biodiesel, g/s (A)	Amoniak, g/s (A)	GHG, CO_2 ekw./s (D)	GHG, CO_2 ekw./s (A)
2700	12.00	0.323	0.202	0.412	0.951	1.012
2700	8.00	0.249	0.203	0.232	0.733	1.126
2700	4.00	0.180	0.195	0.000	0.523	0.529
2400	17.00	0.400	0.184	0.492	1.152	0.871
2400	12.00	0.277	0.182	0.346	0.815	0.856
2400	8.00	0.220	0.181	0.175	0.648	0.996
2400	4.00	0.164	0.170	0.000	0.475	0.464
2100	17.00	0.334	0.154	0.480	0.979	0.728
2100	12.00	0.243	0.156	0.317	0.719	0.715
2100	8.00	0.182	0.155	0.169	0.537	0.893
2100	4.00	0.134	0.147	0.000	0.391	0.401
1800	17.00	0.291	0.129	0.428	0.842	0.653

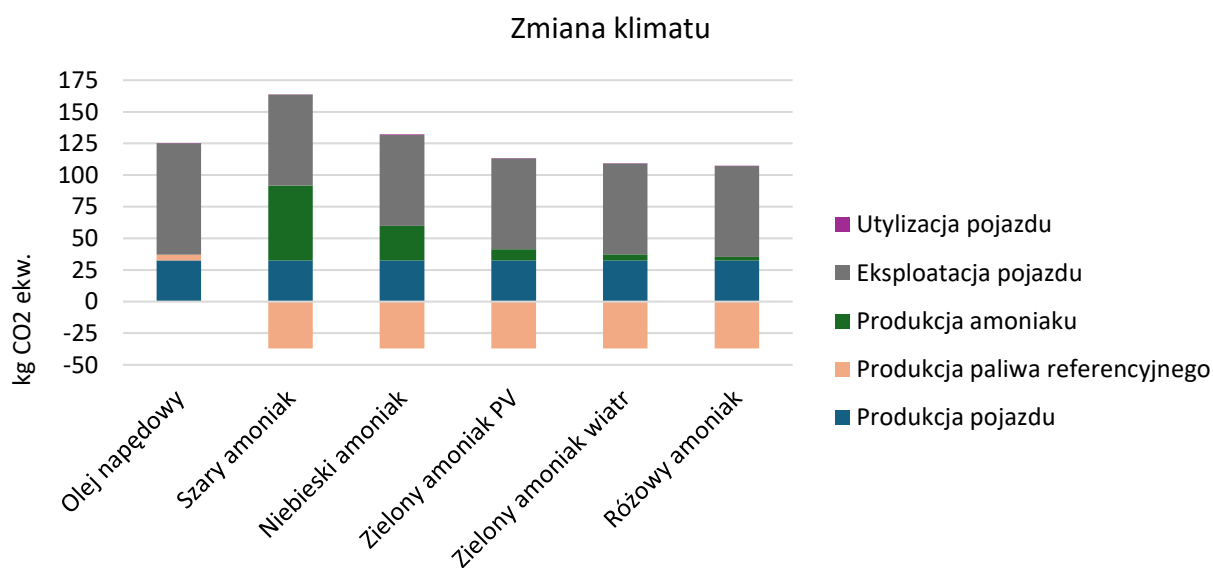
1800	12.00	0.205	0.128	0.281	0.604	0.680
1800	8.00	0.156	0.132	0.142	0.461	0.823
1800	4.00	0.111	0.126	0.000	0.325	0.345
1500	17.00	0.252	0.111	0.356	0.723	0.548
1500	12.00	0.178	0.110	0.237	0.525	0.561
1500	8.00	0.134	0.111	0.124	0.397	0.672
1500	4.00	0.094	0.107	0.000	0.276	0.293
1200	17.00	0.214	0.093	0.284	0.604	0.442
1200	12.00	0.153	0.093	0.193	0.448	0.441
1200	8.00	0.110	0.091	0.105	0.324	0.520
1200	4.00	0.079	0.088	0.000	0.232	0.241

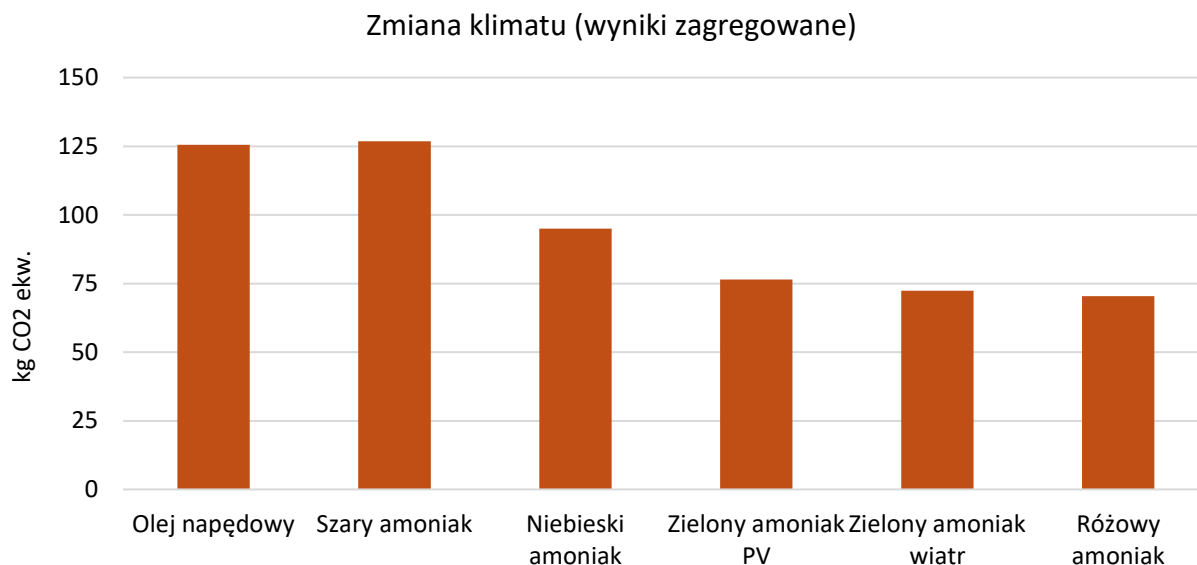
Rozdział 4 – LCA mini traktora zasilanego amoniakiem

Wpływ produkcji mini traktora na środowisko oparty jest na procesie dostępnym w ramach bazy danych wykorzystywanego oprogramowania; metody produkcji paliw są spójne z podejściem zaprezentowanym w rozdziale 2. Z uwagi na to, że silnik pracuje w układzie dwupaliwowym, należy uwzględnić ślad środowiskowy wynikający z produkcji biodiesla, zgodnie z Rysunek 1. Biodiesel zamodelowano jako produkt transestryfikacji olejów/tłuszczów metanolem w oparciu o dane literaturowe [18], zakładając wariant z metanolem w stanie nadkrytycznym i propanem jako współrozpuszczalnikiem. Transport biodiesla i amoniaku, przed ich zastosowaniem w ICE, zamodelowano jako 150 km transportu drogowego pojazdem ciężarowym klasy Euro V. Fazę EoL odwzorowano za pomocą procesu „car shredder” z bazy danych oprogramowania [15].

Z uwagi na fakt, iż analizowany silnik wykorzystywany jest w mini traktorach służących do prac sadowniczych, a emisje zależą od warunków pracy silnika, cykl pracy pojazdu musi zostać szczegółowo scharakteryzowany. Najpierw, na podstawie literatury [19], zebrano typowe czynności wykonywane w sadzie oraz ich roczne częstości dla reprezentatywnego sadu jabłoniowego. Następnie opracowano przeskalowany model CAD sadu, aby zasymulować ruch traktora podczas takich aktywności jak zmiatanie, pielenie/motyczenie, koszenie, opryski, zbiory oraz przycinanie. W kolejnym kroku zdefiniowano teoretyczny model pracy skrzyni biegów: czynności podzielono na podczynności (np. dojazd do sadu drogą żwirową, zawracanie, przejazd między rzędami), a każdej z nich przypisano kombinację bieg–prędkość. Uwzględniając charakterystykę mini traktora, opory toczenia, opór aerodynamiczny oraz typ wykonywanej czynności, wyznaczono prędkość obrotową i moment obrotowy wału silnika. Na podstawie tak wyznaczonych punktów pracy silnika, w zestawieniu z eksperymentalnie zmierzoną mapą silnika, z interpolacji obliczono zużycie paliwa i emisje, co stanowi fazę eksploatacji w ramach LCA.

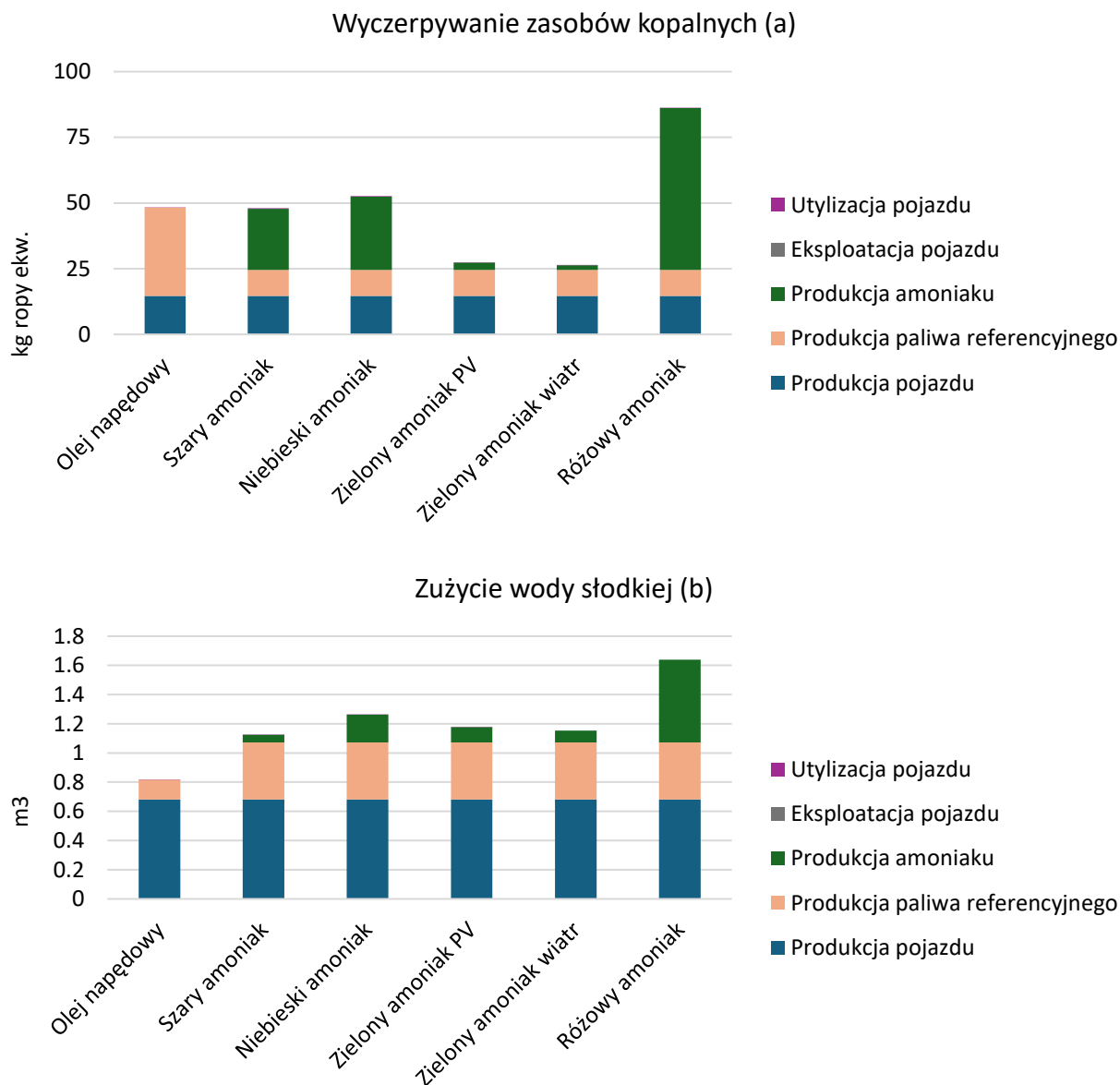
Wyniki w kategorii zmiany klimatu przedstawiono na Rysunek 6 (a). Produkcja paliwa referencyjnego dotyczy oleju napędowego dla mini traktora napędzanego dieslem oraz biodiesla dla pojazdu napędzanego amoniakiem. W przypadku mini traktora zasilanego dieslem eksploatacja pojazdu determinuje jego ślad środowiskowy w tej kategorii (ok. 70 %), w dalszej kolejności jest produkcja traktora oraz paliwa; koniec życia ma pomijalny wpływ. Obciążenie środowiskowe wynika przede wszystkim z emisji CO₂, uwzględniając CH₄ i N₂O. Kolejnym czynnikiem jest produkcja amoniaku. W przypadku amoniaku niebieskiego (SMR z CCS) emisje z produkcji amoniaku są około dwukrotnie niższe niż w przypadku amoniaku szarego; ścieżki produkcji oparte na elektrolizie redukują je jeszcze bardziej, przy czym najniższe wartości uzyskuje wariant różowy (jądrowy). We wszystkich scenariuszach zasilania silnika amoniakiem faza użytkowania jest również głównym źródłem wpływu. Eksploatacja silnika zasilanego amoniakiem generuje mniej CO₂ (wartość niezerowa z powodu paliwa pilotażowego – biodiesla), ale więcej N₂O niż olej napędowy, co wpływa na bilans gazów cieplarnianych. W całym cyklu pracy ciągnik na amoniak emituje ok. 72 kg CO₂ ekw., w porównaniu z ok. 88 kg CO₂ ekw. dla diesla, co oznacza redukcję o 18%. Trzecią pozycją jest produkcja paliwa pilotażowego (biodiesla). Ujemny wkład biodiesla wynika z przypisania pochłaniania biogenicznego CO₂ w uprawie rzepaku, co poprawia bilans całkowity mini traktora. Produkcja ciągnika jest identyczna we wszystkich scenariuszach; dostosowanie pojazdu do spalania amoniaku (zbiornik NH₃ oraz linia paliwowa) zwiększa masę pojazdu o mniej niż 5%, co uznano za pomijalne. Zagregowane wyniki na Rysunek 6 (b) pokazują największą redukcję emisji gazów cieplarnianych w przypadku amoniaku wytwarzanego w procesie elektrolizy z energii wiatrowej i jądrowej, wynoszącą odpowiednio około 42% i 44% w porównaniu z olejem napędowym.





Rysunek 6. Wyniki LCA: zmiana klimatu.

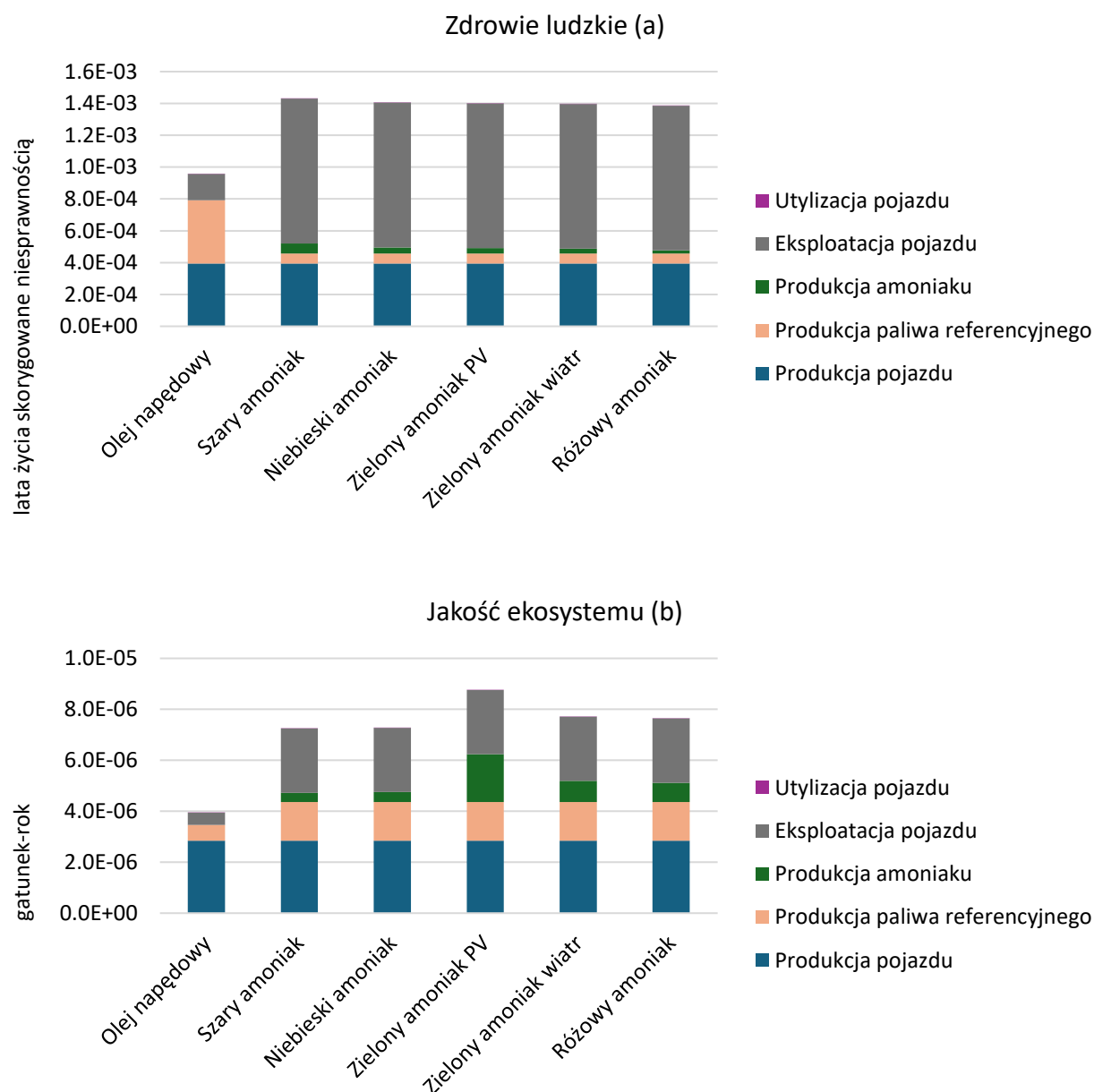
Wyniki w kategorii wyczerpywania zasobów kopalnych (Rysunek 7 (a)) zdeterminowane są przez fazy produkcji paliw oraz produkcji pojazdu. Szary amoniak osiąga porównywalny wynik z olejem napędowym, natomiast amoniak niebieski osiąga nieznacznie wyższy wpływ wynikający z uwzględnienia wpływu technologii CCS. Amoniak odnawialny charakteryzuje się najniższym zużyciem zasobów kopalnych, wynoszącym około 43% (energia słoneczna) i 45% (energia wiatrowa) wartości oleju napędowego. Zużycie zasobów kopalnych w przypadku energii jądrowej jest o 78 % wyższe niż w przypadku oleju napędowego, co wynika z wysokiego zużycia zasobów uranu. Produkcja biodiesla również przyczynia się do wyczerpywania zasobów kopalnych w związku z przetwarzaniem rzepaku, ale jego udział pozostaje niższy niż udział produkcji pojazdu. Zużycie wody słodkiej (Rysunek 7 (b)) we wszystkich przypadkach determinuje produkcja pojazdu, drugim czynnikiem jest produkcja paliwa. Wszystkie scenariusze zasilania amoniakiem są o około 40–50% wyższe niż dla przypadku diesla, głównie ze względu na zużycie wody w łańcuchu dostaw biodiesla (uprawy rzepaku). Spośród rozpatrywanych metod produkcji amoniaku największe zapotrzebowanie na wodę słodką ma amoniak oparty na energii jądrowej, co wynika z potrzeb chłodniczych elektrowni.



Rysunek 7. Wyniki LCA: wyczerpywanie zasobów kopalnych i zużycie wody słodkiej.

Rysunek 8 (a) prezentuje wyniki w kategorii końcowej zdrowie ludzkie. W przypadku diesla największy wpływ na wyniki mają fazy: produkcja oleju napędowego oraz produkcja pojazdu, co wynika głównie z pośredniej kategorii wpływu toksyczność dla człowieka (miara emisji związków rakotwórczych wyrażona w ekwiwalentach 1,4-dichlorobenzenu). W wariantach zasilania silnika amoniakiem dominuje faza użytkowania, przede wszystkim ze względu na podwyższone emisje NH_3 i NO_2 (traktowane jako cząstki stałe pochodzenia wtórnego w ramach metody ReCiPe); produkcja pojazdu jest czynnikiem następującym. Łącznie oddziaływania na zdrowie ludzkie są w scenariuszach amoniakalnych o ok. 47% wyższe niż dla diesla. Rysunek 8 (b) pokazuje wyniki w kategorii jakość ekosystemu. Dla diesla dominuje faza produkcji pojazdu, następnie produkcja

oleju napędowego i faza użytkowania. W wariantach amoniakalnych istotny wkład w tej kategorii wnoszą również produkcja biodiesla – jej oddziaływania są ok. 2,5 razy wyższe niż produkcja diesla, co związane jest z przetwarzaniem gruntów pod uprawę rzepaku. Wkład ma również produkcja amoniaku; najwyższe wartości uzyskują ścieżki elektrolityczne, zwłaszcza przy zasilaniu energią z PV, ze względu na toksyczność dla ekosystemów lądowych wynikającą z wytwarzania paneli PV oraz ich fazy końca życia. Oddziaływania fazy użytkowania są ok. pięciokrotnie wyższe dla amoniaku niż dla diesla, ponownie z uwagi na podwyższone emisje NO_x i NH_3 . Sumarycznie mini traktor zasilany amoniakiem ma około dwukrotnie wyższy wpływ na jakość ekosystemu niż mini traktor z silnikiem diesla.



Rysunek 8. Wyniki LCA: zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu.

Rozdział 5 – LCC mini traktora zasilanego amoniakiem

Analizę przeprowadzono z perspektywy właściciela małego sadu, który dokonuje zakupu nowego pojazdu: (i) traktora zasilanego olejem napędowym albo (ii) traktora zasilanego amoniakiem, opartym na tym samym podwoziu jak traktor zasilany dieslem, lecz z silnikiem przystosowanym do wtrysku pośredniego NH_3 (port injection). Różnica między pojazdami sprowadza się do kosztu instalacji amoniakalnej; przyjęto, że dystrybucja dealerska oraz marża sprzedawcy pojazdu są takie same dla obu przypadków. Rozważane warianty są wzajemnie wykluczające i oceniane jako niezależne, jednorazowe zakupy inwestycyjne. Analiza LCC obejmuje koszty inwestycyjne, koszty eksploatacji (paliwo i konserwacja/utrzymanie) oraz koszty końca życia. Analizę oparto przede wszystkim o dane rynkowe z USA (traktowane jako międzynarodowe). Koszty paliwa obejmują NH_3 (dla metod produkcji spójnych z LCA) oraz biodiesel, natomiast koszty utrzymania i EoL ujęto w sposób uproszczony jako proporcjonalne do ceny zakupu. Wszystkie wartości podano w dolarach z 2024 r. (2024 \$).

Koszt adaptacji traktora do zasilania amoniakiem oszacowano na podstawie danych z eksperymentów realizowanych w projekcie ACTIVATE i obejmuje on: zbiornik amoniaku, linię paliwową, układ selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) oraz serwis fabryczny (prace montażowe). Koszty operacyjne zależą od cen amoniaku i biodiesla w przypadku ciągnika zasilanego amoniakiem oraz od ceny oleju napędowego w przypadku ciągnika z silnikiem wysokoprężnym, a także od zużycia paliwa przez silnik. Roczne zużycie paliwa przyjęto na podstawie wyników LCA (Rozdział 4) i zastosowano bezpośrednio w analizie LCC. Ceny oleju napędowego i biodiesla zaczerpnięto z danych statystycznych [20]. Koszty produkcji amoniaku wyznaczono na podstawie funkcji kosztowych opracowanych na podstawie raportu IEA [21]. W celu przeliczenia kosztu amoniaku na cenę końcową doliczono marżę detaliczną, uwzględniając koszty dystrybucji (transport paliwa), magazynowania (utrzymanie infrastruktury), podatki oraz marżę sprzedawcy.

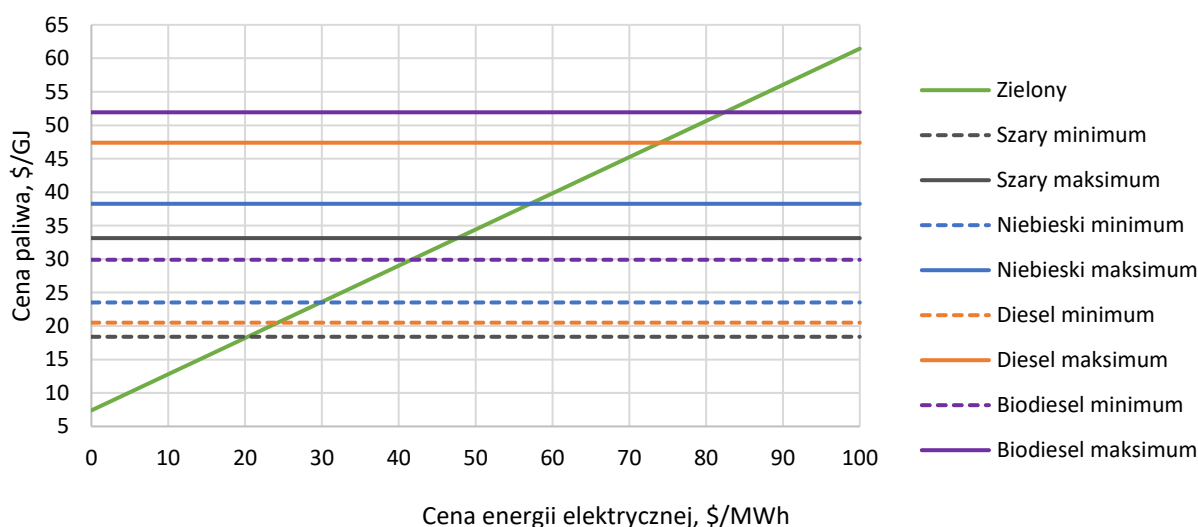
Pełny zestaw założeń LCC jest następujący:

- i. Horyzont czasowy: 10 lat
- ii. Olej napędowy/biodiesel: ceny w pierwszym roku pochodzą z danych U.S. Department of Energy (średnia detaliczna za 2024 r.) [20]. Zmiany cen w czasie przyjęto zgodnie z prognozami U.S. Energy Information Administration (EIA) [22].
- iii. Amoniak: dla amoniaku szarego i niebieskiego początkowa cena gazu ziemnego oraz jej trajektoria w kolejnych latach pochodzą z prognoz EIA [23]. Dla amoniaku opartego na elektrolizie, ceny energii elektrycznej przyjęto z kalkulatora IEA Levelized Cost of Electricity (LCOE) [24]; nie uwzględniono zmian cen w czasie:
 - a. zielony PV – PV w dużej skali (wariant medianowy, 100 MW)

- b. zielony wiatr – lądowa energetyka wiatrowa (≥ 1 MW, wariant medianowy, 100 MW)
- c. różowy – długoterminowa eksploatacja elektrowni (10 lat, 1000 MW)
- iv. Do wszystkich operacyjnych przepływów pieniężnych zastosowano realną stopę dyskontową 5%.
- v. Ceny w pierwszym roku wynoszą: diesel 1,06 \$/l, biodiesel 1,20 \$/l, gaz ziemny 4,58 \$/MMBtu, energia elektryczna z PV 52,7 \$/MWh, z wiatru 46,5 \$/MWh oraz z energetyki jądrowej 43,0 \$/MWh.

Analizę progu opłacalności paliwa w odniesieniu do 1 GJ (na podstawie LHV) przedstawiono na Rysunek 9; przyjęto następujące założenia:

- i. Zielony: amoniak oparty na elektrolizie
- ii. Szary minimum: amoniak z gazu ziemnego przy 3,5 \$/MMBtu
- iii. Szary maksimum: amoniak z gazu ziemnego przy 12 \$/MMBtu
- iv. Niebieski minimum: amoniak z gazu ziemnego z CCS przy 3,5 \$/MMBtu
- v. Niebieski maksimum: amoniak z gazu ziemnego z CCS przy 12 \$/MMBtu
- vi. Diesel minimum: minimalna cena detaliczna w latach 2013–2023 na podstawie [20] – 0,74 \$/l
- vii. Diesel maksimum: maksymalna cena detaliczna w latach 2013–2023 na podstawie [20] – 1,70 \$/l
- viii. Biodiesel minimum: analogicznie do diesla – 0,98 \$/l
- ix. Biodiesel maksimum: analogicznie do diesla – 1,71 \$/l

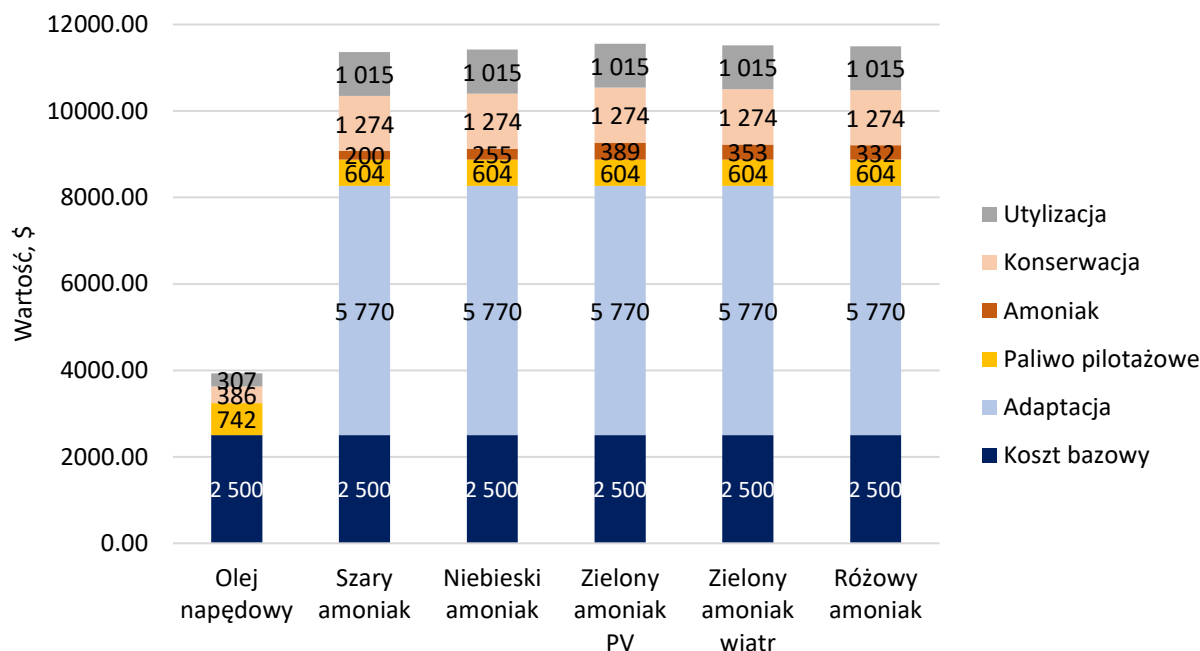


Rysunek 9. Porównanie cen amoniaku i pozostałych paliw w odniesieniu do GJ.

Przy niskich cenach gazu ziemnego graniczna cena energii elektrycznej wynosi 20,5 \$/MWh względem amoniaku szarego minimum oraz 30 \$/MWh względem amoniaku niebieskiego minimum. Z kalkulatora LCOE IEA wynika, że cena energii elektrycznej wynosi ok. 40 \$/MWh dla energetyki jądrowej (LTO, 1000 MW), lądowej energetyki wiatrowej (≥ 1 MW) oraz wielkoskalowej fotowoltaiki w najbardziej sprzyjających warunkach; w takich przypadkach zielony i różowy amoniak nie są w stanie konkurować z amoniakiem opartym na gazie ziemnym. Przy wysokich cenach gazu wartości graniczne rosną do 47 \$/MWh (amoniak szary maksimum) oraz 57 \$/MWh (niebieski maksimum). W tych warunkach zielony lub różowy amoniak może być tańszy niż amoniak oparty na gazie ziemnym, jednak należy to przeanalizować dla indywidualnych studiów przypadków. Dla diesla wariant minimum plasuje się pomiędzy minimum amoniaku szarego i niebieskiego, co daje graniczną cenę energii dla zielonego amoniaku równą 24 \$/MWh; przy maksymalnej cenie diesla wartość graniczna wynosi 74 \$/MWh. Dla biodiesla wartości graniczne to 42 \$/MWh (minimum) oraz 82,5 \$/MWh (maksimum), co oznacza, że biodiesel jest na ogół najdroższą opcją.

Druga część wyników dotyczy studium przypadku LCC. Rysunek 10 agreguje wszystkie składowe kosztów dla ciągnika zasilanego amoniakiem (z rozróżnieniem źródła amoniaku) oraz dla ciągnika zasilanego dieslem. Koszt bazowy odnosi się do nakładów inwestycyjnych na zakup mini traktora zasilanego dieslem, adaptacja dotyczy kosztu konwersji pojazdu do zasilania amoniakiem, natomiast paliwo pilotażowe odnosi się do diesla w wariantcie zasilania dieslem oraz biodiesla w wariantcie amoniakalnym.

Wynik LCC dla traktora zasilanego amoniakiem jest około trzykrotnie wyższy niż w przypadku LCC traktora zasilanego dieslem, co spowodowane jest głównie tym, iż nakłady inwestycyjne dla pojazdu amoniakalnego są ok. 3,3 razy wyższe od pojazdu zasilanego dieslem. Wynika to z kosztu adaptacji pojazdu do zasilania amoniakiem, uwzględniającego koszt sprzętu oraz usług fabrycznych (prac montażowych), który odpowiada za ok. połowę całkowitych nakładów inwestycyjnych mini traktora amoniakalnego. Koszt paliwa pilotażowego jest wyższy dla pojazdu zasilanego dieslem niż dla przypadku amoniakalnego, co odzwierciedla większe zużycie diesla w porównaniu z niewielkim zapotrzebowaniem na biodiesel wykorzystywanym w układzie dwupaliwowym. Koszt amoniaku stanowi jedynie 2–3% całkowitego LCC pojazdu zasilanego amoniakiem. Dla szarego i niebieskiego amoniaku wynika to z niskich cen gazu ziemnego przyjętych w analizie (3,15–4,58 \$/MMBtu). Amoniak z elektrolizy przy cenach energii elektrycznej rzędu 43–53 \$/MWh jest droższy niż amoniak oparty na gazie ziemnym przy niskich cenach gazu, zgodnie z wynikami zaprezentowanymi na Rysunek 9. Z uwagi na to, że biodiesel kosztuje ok. 1,1 \$/l, a pojazd amoniakalny zużywa również biodiesel, całkowite wydatki na paliwo dla ciągnika amoniakalnego są o ok. 10–30% wyższe niż dla mini traktora zasilanego dieslem (w zależności od metod produkcji amoniaku). Koszty konserwacji oraz EoL obliczone zostały jako część kosztu nabycia pojazdu, a zatem są one ok. 3,3 razy wyższe dla ciągnika amoniakalnego.



Rysunek 10. Wyniki LCC.

Na Rysunek 10 pokazano, że mini traktor zasilany amoniakiem jest znacznie droższy od wariantu referencyjnego z silnikiem diesla, głównie ze względu na koszty nabycia pojazdu. Należy jednak zauważyć, że oddolnie zagregowane nakłady inwestycyjne („bottom-up approach”) mogą odbiegać od wartości rynkowych: produkcja wielkoseryjna mogłaby obniżyć koszty sprzętu i usług fabrycznych, jednak potencjalne dodatkowe wymagania w zakresie bezpieczeństwa i układów sterowania mogłyby je podnieść. Ceny paliw również opierają się na założeniach oraz trendach prognostycznych, które mogą nie odpowiadać przyszłym realiom. W związku z tym wyniki LCC lepiej przedstawiać jako przedział wyników.

Przyjmując zakres wrażliwości $\pm 30\%$ (jako wczesnoetapowy przedział szacowania [25]) dla nakładów inwestycyjnych oraz zmienność cen paliw zgodnie z założeniami LCC, można zdefiniować przedział LCC i opisać go scenariuszami: najlepszym (BS) i najgorszym (WS).

Najlepszy scenariusz (BS) – korzystne założenia rynkowe:

- i. Nakłady inwestycyjne: -30% dla wszystkich składowych.
- ii. Biodiesel: 0,98 \$/l.
- iii. Gaz ziemny: 3,5 \$/MMBtu.
- iv. Energia elektryczna: 43,0 \$/MWh.

Najgorszy scenariusz (WS) – niekorzystne założenia rynkowe:

- i. Nakłady inwestycyjne: +30% dla wszystkich składowych.
- ii. Biodiesel: 1,71 \$/l.
- iii. Gaz ziemny: 12 \$/MMBtu.
- iv. Energia elektryczna: 52,7 \$/MWh.
- v. Cena amoniaku zostaje podniesiona o koszt regulacyjny emisji na poziomie 35 \$/tCO₂ (dla amoniaku szarego i niebieskiego) oraz o koszt transportu 70 \$/t NH₃ (dla wszystkich metod produkcji amoniaku).

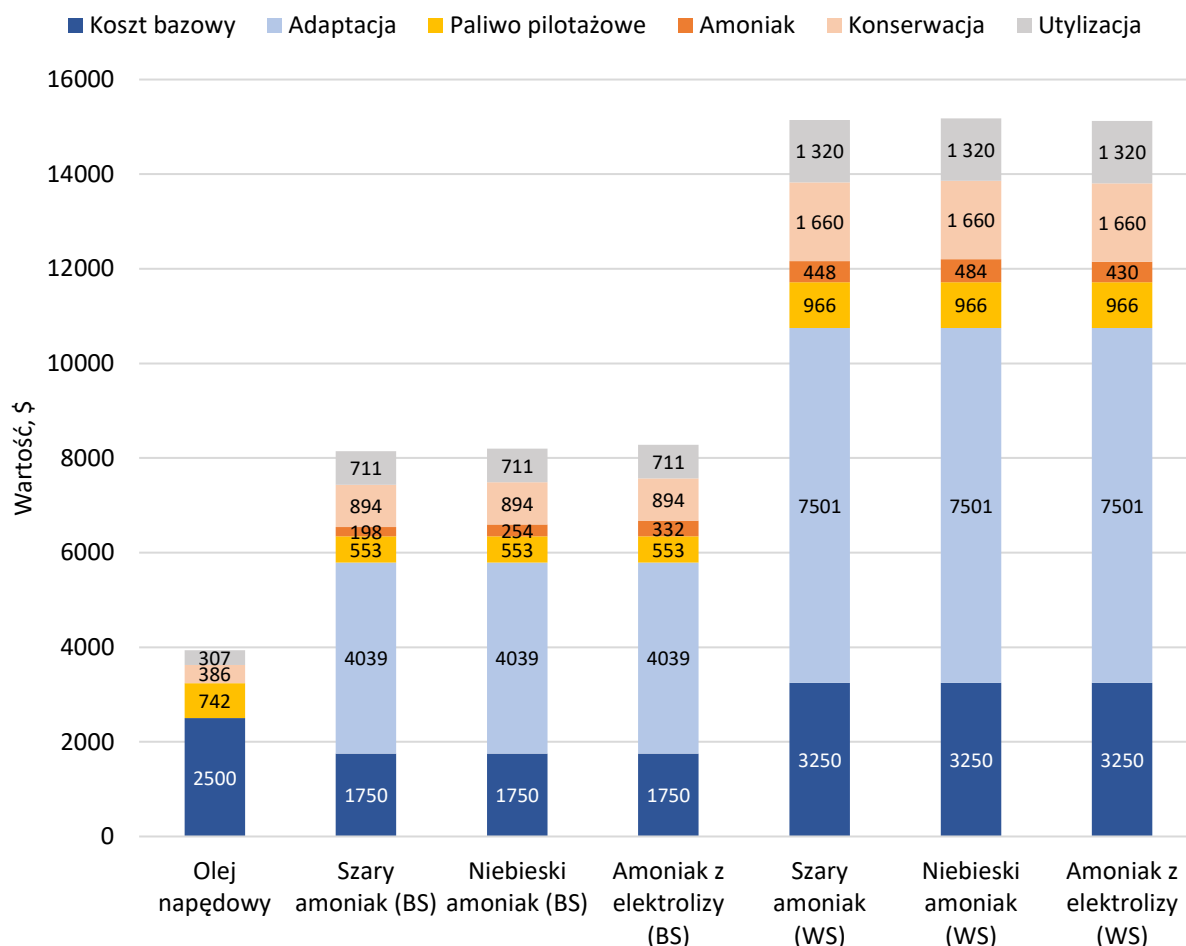
Rysunek 11 zestawia scenariusze BS i WS. W wariancie bazowym koszt amoniaku odpowiada jedynie za ok. 2–3% całkowitego LCC, w scenariuszach BS/WS trend ten nie ulega zmianie. Zależnie od sytuacji rynkowej można stwierdzić, że:

- i. Nakłady inwestycyjne dla mini traktora zasilanego amoniakiem są 2,3–4,3 razy większe niż dla mini traktora zasilanego dieslem.
- ii. Łączny koszt paliwa (amoniak plus paliwo pilotażowe) jest 1,1–2,0 razy większy niż dla zasilania dieslem, z wyjątkiem amoniaku szarego, który przy niskich cenach biodiesla i gazu może zbliżać się do poziomu diesla.
- iii. Koszty konserwacji i utylizacji (proporcjonalne do ceny zakupu) są także 2,3–4,3 razy większe niż dla pojazdu zasilanego olejem napędowym.

Rozdział 6 – Podsumowanie

Dwa główne cele niniejszej pracy – (i) ocena różnic w oddziaływaniach środowiskowych pomiędzy mini traktorem zasilanym amoniakiem i mini traktorem zasilanym olejem napędowym z wykorzystaniem oceny cyklu życia (LCA) oraz (ii) porównanie ich wyników ekonomicznych metodą rachunku kosztów cyklu życia (LCC) – zostały osiągnięte. Ocena środowiskowa metod wytwarzania amoniaku, przyjmując zmianę klimatu jako główne kryterium, wykazuje, że spośród analizowanych opcji preferowany jest amoniak wytwarzany metodą elektrolizy zasilanej energią jądrową. Jednak jego wysokie zużycie wody słodkiej oraz wysokie wyczerpywanie zasobów kopalnych (wynikające z wykorzystania uranu, który uwzględniony jest w tej kategorii w ramach metody ReCiPe) mogą stanowić istotne ograniczenia, szczególnie w regionach o deficycie wody lub ograniczonej dostępności zasobów. W takich warunkach lepszą opcją może być elektroliza zasilana energią wiatrową: znacząco obniża oddziaływania w tych dwóch kategoriach, przy jednoczesnym utrzymaniu niskiego wpływu w kategorii zmiany klimatu, która stanowi główną motywację do rozwijania paliw alternatywnych. W porównaniu z olejem napędowym wszystkie metody produkcji amoniaku – z wyjątkiem wariantu szarego (SMR bez CCS) – spełniają cel dekarbonizacji, przy czym amoniak niebieski zapewnia jedynie umiarkowaną poprawę. W ramach kategorii końcowych, pojazd zasilany amoniakiem opartym na energii jądrowej oraz wiatrowej wykazuje najniższe oddziaływanie w kategorii zdrowie ludzkie, natomiast niezależnie od źródła

amoniaku, pogarsza jakość ekosystemu względem diesla, przy szczególnie wysokich wartościach osiąganych dla amoniaku opartego na energii elektrycznej z fotowoltaiki. Analiza pracy silnika pokazuje, że choć silnik zasilany amoniakiem emituje mniej CO₂ niż w przypadku zasilania dieslem, występują emisje NO_x oraz N₂O, zwłaszcza przy obciążeniach częściowych.



Rysunek 11. Zakres szacowanych wyników LCC.

Założenie, że amoniak może wspierać dekarbonizację silników spalinowych – jako paliwo potencjalnie odnawialne, które nie powoduje emisji związków węgla przy spalaniu – zostało potwierdzone dla przypadku mini traktora wykorzystywanego w sadownictwie, jednak skala korzyści silnie zależy od sposobu pracy silnika. W odniesieniu do diesla analizowany pojazd amoniakalny wykazuje mniejsze emisje GHG (ok. 72 kg CO₂ ekw. wobec ok. 88 kg CO₂ ekw., tj. redukcję o 18% ograniczoną przez emisję N₂O oraz emisję CO₂ pochodzącego z paliwa pilotażowego). W ujęciu cyklu życia przejście na amoniak z biodieslem jako paliwem pilotażowym mocniej redukuje wpływ na zmianę klimatu – o 42–44% – gdy amoniak jest wytwarzany z energii wiatrowej lub jądrowej oraz uwzględniony zostaje ślad węglowy produkcji biodiesla. W kategorii

wyczerpywania zasobów kopalnych pojazd zasilany amoniakiem pochodzącym z energii słonecznej i wiatrowej zapewnia redukcje rzędu 43–45%; w przypadku gdy wykorzystany jest amoniak oparty na energii jądrowej oddziaływanie w tej kategorii jest zwiększone o ok. 78%. Zużycie wody słodkiej jest o 40–50% wyższe dla pojazdu amoniakalnego w stosunku do diesla dla wszystkich metod produkcji amoniaku, przy czym wariant jądrowy osiąga niemal dwukrotnie wyższy wpływ. Dla różnych scenariuszy pochodzenia amoniaku pojazd amoniakalny zwiększa oddziaływania w kategorii zdrowie ludzkie o ok. 47% względem diesla, głównie ze względu na wtórne cząstki stałe powstające z emisji NH_3/NO_x , oraz w przybliżeniu podwaja oddziaływanie w kategorii jakość ekosystemu, co wynika z emisji powstających w fazie użytkowania, jak i obciążenia związanego z fazą produkcji amoniaku.

Podsumowując, w kategorii zmiany klimatu najlepiej plasuje się opcja pojazdu zasilanego amoniakiem opartym na energii jądrowej, jednak z uwagi na jej wysoki wpływ na wyczerpywanie zasobów kopalnych oraz zużycie wody słodkiej, należy te czynniki uwzględnić w długoterminowym planowaniu zasobów oraz w regionach dotkniętych deficytem wody. Wariant z zielonym amoniakiem z elektrolizy zasilanej wiatrem ma nieznacznie wyższe oddziaływania w kategorii zmiany klimatu, lecz znacznie niższy wpływ na wyczerpywanie zasobów kopalnych i zużycie wody słodkiej. Biorąc to pod uwagę, taka opcja może być uznana za najbardziej zrównoważoną z punktu widzenia środowiska. Niemniej, wyniki w ramach kategorii końcowych pokazują, że podwyższone emisje NO_x i NH_3 występujące w pojeździe amoniakalnym na skutek spalania muszą zostać zredukowane, ponieważ dla wszystkich scenariuszy mini traktor zasilany amoniakiem wypada gorzej niż diesel pod względem wpływu na zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu.

Ocena LCC zidentyfikowała warunki, w których mini traktor zasilany amoniakiem mógłby stać się konkurencyjny ekonomicznie względem pojazdu zasilanego olejem napędowym. Po pierwsze, porównanie kosztów amoniaku opartego na gazie ziemnym i amoniaku z elektrolizy wskazuje, że przy niskich cenach gazu (3,5 \$/MMBtu) elektroliza wymagałaby cen energii elektrycznej poniżej ok. 20–30 \$/MWh, co w większości warunków jest mało prawdopodobne. Przy wyższych cenach gazu (12 \$/MMBtu) amoniak z elektrolizy może stać się preferowaną opcją, jeśli energia elektryczna kosztuje ok. 47–57 \$/MWh, co jest osiągalne w sprzyjających warunkach dla OZE lub energetyki jądrowej (około 40–46 \$/MWh). Po drugie, w porównaniu z dieslem: przy niskiej cenie oleju napędowego (0,74 \$/l) konkurencyjny jest jedynie amoniak oparty na gazie ziemnym przy niskich cenach gazu; elektroliza wymagałaby ceny energii elektrycznej poniżej 24 \$/MWh, co jest mało realne. Przy wysokiej cenie diesla (1,70 \$/l) zrównanie kosztów jest możliwe, jeśli cena energii pozostaje poniżej 74 \$/MWh, co w wielu przypadkach jest wykonalne.

W studium przypadku LCC, przy przyjętych założeniach, nakłady inwestycyjne na mini traktor zasilany amoniakiem są ok. 3,3 razy wyższe niż dla referencyjnego pojazdu zasilanego olejem

napędowym. Łączne koszty paliwa dla pojazdu amoniakalnego są o 10–30% wyższe niż dla diesla; różnicę tę można zmniejszyć poprzez obniżenie cen amoniaku lub biodiesla, przy czym szczególnie skuteczne byłoby obniżenie ceny biodiesla, którego koszt dominuje w strukturze łącznych wydatków na paliwo. Uwzględniając niepewność nakładów inwestycyjnych oraz zmienność cen paliw, LCC pojazdu zasilanego amoniakiem kształtuje się na około 2–4 razy wyższym poziomie niż LCC mini traktora napędzanego olejem napędowym. W celu zmniejszenia tej różnicy, decydenci polityczni mogliby wprowadzić dopłaty dla traktorów o niskiej emisji, kompensując właścicielom wysokie koszty zakupu nowego pojazdu.

Bibliografia

- [1] Global Change Data Lab, „Global direct primary energy consumption”, Our World in Data. Dostęp: 10 października 2025. [Online]. Dostępne na: <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy>
- [2] „Higher Calorific Values of Common Fuels: Reference & Data”, The Engineering ToolBox. Dostęp: 16 lipca 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- [3] T. Abbasi i S. A. Abbasi, „‘Renewable’ hydrogen: Prospects and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 15, nr 6, s. 3034–3040, sie. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.026.
- [4] „Hydrogen - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure”, The Engineering ToolBox. Dostęp: 16 lipca 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-H2-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2044.html
- [5] H. T. Hwang i A. Varma, „Hydrogen storage for fuel cell vehicles”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, t. 5, s. 42–48, sie. 2014, doi: 10.1016/j.coche.2014.04.004.
- [6] „Ammonia - NH₃ - Thermodynamic Properties”, The Engineering ToolBox. Dostęp: 16 lipca 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_971.html
- [7] „Ammonia - Properties at Gas-Liquid Equilibrium Conditions”, The Engineering ToolBox. Dostęp: 16 lipca 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-gas-liquid-equilibrium-condition-properties-temperature-pressure-boiling-curve-d_2013.html
- [8] A. J. Reiter i S.-C. Kong, „Demonstration of Compression-Ignition Engine Combustion Using Ammonia in Reducing Greenhouse Gas Emissions”, *Energy Fuels*, t. 22, nr 5, s. 2963–2971, wrz. 2008, doi: 10.1021/ef800140f.
- [9] C. Tornatore, L. Marchitto, P. Sabia, i M. De Joannon, „Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives”, *Front. Mech. Eng.*, t. 8, s. 944201, lip. 2022, doi: 10.3389/fmech.2022.944201.
- [10] P. Dimitriou i R. Javaid, „A review of ammonia as a compression ignition engine fuel”, *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 45, nr 11, s. 7098–7118, luty 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.209.

- [11] M.-C. Chiong *et al.*, „Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines”, *Energy Conversion and Management*, t. 244, s. 114460, wrz. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114460.
- [12] United States Environmental Protection Agency (EPA), „Understanding Global Warming Potentials”, United States Environmental Protection Agency. Dostęp: 13 października 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [13] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability, „International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance”, European Commission, Joint Research Centre (JRC), Luxembourg, ILCD Handbook, 2010.
- [14] P. Iradukunda, E. M. Mwanaumo, i J. Kabika, „A review of integrated multicriteria decision support analysis in the climate resilient infrastructure development”, *Environmental and Sustainability Indicators*, t. 20, s. 100312, grudz. 2023, doi: 10.1016/j.indic.2023.100312.
- [15] Sphera Solutions, Inc., „Search Life Cycle Assessment Datasets”, Sphera. Dostęp: 13 października 2025. [Online]. Dostępne na: <https://lcdatabase.sphera.com/>
- [16] Y. Bicer, I. Dincer, C. Zamfirescu, G. Vezina, i F. Raso, „Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods”, *Journal of Cleaner Production*, t. 135, s. 1379–1395, lis. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.023.
- [17] S. Ghavam, M. Vahdati, I. A. G. Wilson, i P. Styring, „Sustainable Ammonia Production Processes”, *Front. Energy Res.*, t. 9, s. 580808, mar. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.580808.
- [18] S. Morais, T. M. Mata, A. A. Martins, G. A. Pinto, i C. A. V. Costa, „Simulation and life cycle assessment of process design alternatives for biodiesel production from waste vegetable oils”, *Journal of Cleaner Production*, t. 18, nr 13, s. 1251–1259, wrz. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.04.014.
- [19] University of Maine, „Calendar of Apple Orchard Management Activities”, Cooperative Extension: Garden and Yard. Dostęp: 18 października 2024. [Online]. Dostępne na: <https://extension.umaine.edu/gardening/manual/calendar-apple-orchard-management-activities/>
- [20] „Alternative Fuels Data Center”, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy. Dostęp: 23 stycznia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html>
- [21] IEA, „The Future of Hydrogen”, cze. 2019. [Online]. Dostępne na: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [22] „Annual Energy Outlook 2023 Table: Table 12. Petroleum and Other Liquids Prices”, U.S. Energy Information Administration. Dostęp: 24 stycznia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=12-AEO2023®ion=0-0&cases=ref2023&start=2021&end=2050&f=A&linechart=ref2023-d020623a.3-12-AEO2023~&map=&ctype=linechart&sourcekey=0>

- [23] „Annual Energy Outlook 2023 Table: Table 13. Natural Gas Supply, Disposition, and Prices”, U.S. Energy Information Administration. Dostęp: 24 stycznia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=13-AEO2023&cases=ref2023&sourcekey=0>
- [24] IEA, „Levelised Cost of Electricity Calculator”. Dostęp: 24 stycznia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator>
- [25] AACE International, „Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries”, AACE International, Recommended Practice 18R-97, rev 2016.