

# Pozyskiwanie energii – technologie wodorowe Wodór z biomasy i odpadów

Maciej Siekierski, Piotr Ryś, Anna Wieczorek

---

## STRESZCZENIE

Polityka Unii Europejskiej od lat nastawiona jest na promowanie źródeł energii, które nie degradują środowiska. Takim źródłem energii może być wodór.

Celem artykułu jest przybliżenie czytelnikom metod pozyskiwania wodoru z biomasy i niektórych odpadów oraz określenie jego koloru. W Unii Europejskiej przypisuje się temu pierwiastkowi różne kolory – zielony, różowy, żółty, niebieski, turkusowy, biały, szary, brązowy i czarny. Kolor zależy od źródła i metody pozyskania. Wodór, jako źródło energii uznawanej za przyjazną środowisku, powinien mieć kolor zielony, różowy lub niebieski.

**Słowa kluczowe:** wodór, biomasa, odpady, odnawialne źródła energii

---

## Wprowadzenie

Polityka Unii Europejskiej od lat nastawiona jest na promowanie źródeł energii, które nie degradują środowiska. Stopniowo eliminuje się węgiel kamienny i brunatny, gaz ziemny oraz ropę naftową. Mają je zastąpić odnawialne źródła energii, ale nie tylko. Coraz częściej wskazuje się na wodór.

Wodór jest najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem we Wszechświecie. Pełni z jednej strony rolę ważnego surowca w przemyśle, np. do wytwarzania nawozów sztucznych, z drugiej – źródła energii. Przy jego spalaniu nie dochodzi do emisji dwutlenku węgla. Niestety, pierwiastek ten występuje prawie wyłącznie w postaci związków chemicznych, a głównymi źródłami pozyskiwania są gaz ziemny, ropa naftowa i węgiel. Dlatego rozważa się inne sposoby zdobywania wodoru, np. przy udziale odnawialnych źródeł energii. Podejmowane są próby pozyskiwania tego pierwiastka za pomocą energii elektrycznej z wiatru (Chile) lub wiatru i słońca (Namibia) oraz z niektórych odpadów. Coraz bardziej obiecujące wydaje się wytwarzanie wodoru z biomasy, w Polsce planuje to PKN ORLEN [Wereda, Polak 2022]. Energia wiatru, energia słoneczna oraz biomasa i wchodzące w jej skład odpady są uznane za odnawialne źródła energii.

Wodór uznany za źródło energii przyjazne środowisku powinien mieć kolor zielony, różowy lub niebieski. Wyjaśnienia wymaga, że w Unii Europejskiej przypisuje się temu pierwiastkowi różne kolory – zielony, różowy, żółty, niebieski, turkusowy, biały, szary, brązowy i czarny. Kolor zależy od źródła i metody pozyskania [A hydrogen strategy... 2020].

Celem artykułu jest przybliżenie czytelnikom metod pozyskiwania wodoru z biomasy i niektórych odpadów oraz określenie jego koloru.

## Biomasa, odpady, odnawialne źródła energii

Aktami prawa, które odnoszą się do biomasy i odpadów są ustawa o odnawialnych źródłach energii (uoze) oraz ustawa o odpadach (uod).

Pod pojęciem biomasa należy rozumieć „ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęglu, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów” [art. 2 pkt 3 uoże].

Uściśleniem tej definicji jest określenie czym jest biomasa pochodzenia rolniczo – jest to biomasa pochodząca „z upraw energetycznych, a także odpady lub pozostałości z produkcji rolnej oraz przemysłu przetwarzającego jej produkty” [art. 2 pkt 3b uoże].

Odpady, to każda substancja lub przedmiot, „których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany” [art. 3 ust. 1 pkt 6 uod].

Podkreślenia wymaga, że przepisów ustawy o odpadach nie stosuje się do „biomasy w postaci:

- a) odchodów podlegających przepisom rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, i uchylającego rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego) (Dz.Urz. UE L 300 z 14.11.2009, s. 1, z późn. zm.), zwanego dalej rozporządzeniem (WE) nr 1069/2009,
- b) słomy,
- c) innych, niebędących niebezpiecznymi, naturalnych substancji pochodzących z produkcji rolniczej lub leśnej

– wykorzystywanej w rolnictwie, leśnictwie lub do produkcji energii z takiej biomasy za pomocą procesów lub metod, które nie są szkodliwe dla środowiska ani nie stanowią zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi” [art. 2 pkt 6 uod].

Przepisów ustawy o odpadach nie stosuje się również do „osadów przemieszczanych w obrębie wód powierzchniowych w celu związanym z gospodarowaniem wodami (...) jeżeli osady te nie są niebezpieczne” oraz do ścieków [art. 2 pkt 7 i pkt 8 uod].

Odnawialne źródła energii, to „odnawialne, niekopalne źródła energii obejmujące energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię aerothermalną, energię

geotermalną, energię hydrotermalną, hydroenergię, energię fal, prądów i pływów morskich, energię otrzymywaną z biomasy, biogazu, biogazu rolniczego oraz z biopłynów” [art. 2 pkt 22 uoże].

Z powyższego wynika, że:

- biomasa oraz niektóre odpady są uznane za odnawialne źródła energii,
- biomasa w rozumieniu ustawy o odnawialnych źródłach energii jest pojęciem szerszym niż biomasa, o której mowa w ustawie o odpadach.

Należy podkreślić, że ustawa o odnawialnych źródłach energii oraz ustawa o odpadach nie promują, ale i nie zabraniają wytwarzania wodoru z biomasy i odpadów.

Ustawa o odnawialnych źródłach energii określa:

„1) zasady i warunki wykonywania działalności w zakresie wytwarzania:

- a) energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii,
- b) biogazu rolniczego

– w instalacjach odnawialnego źródła energii,

- c) biopłynów;

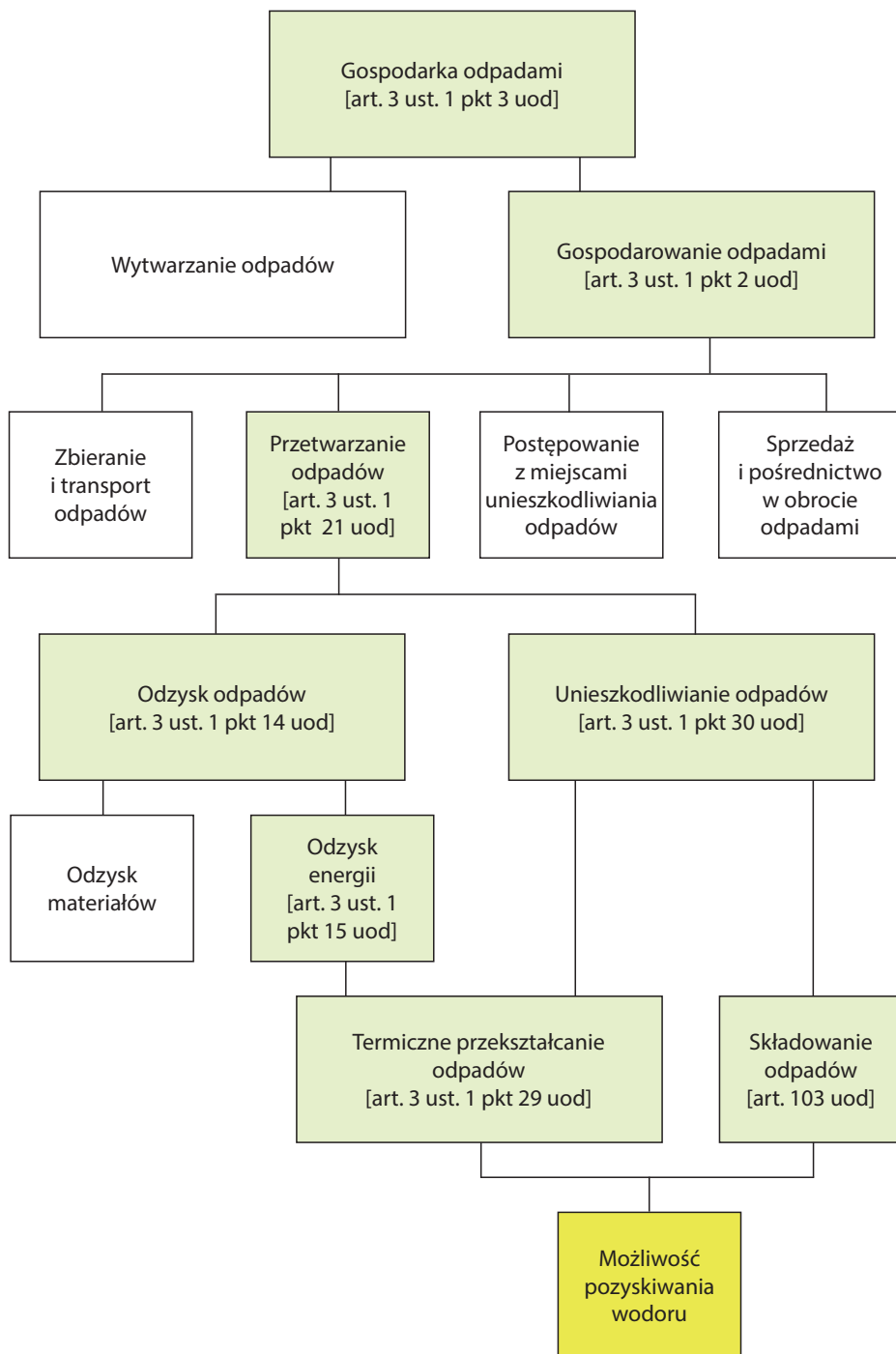
2) mechanizmy i instrumenty wspierające wytwarzanie:

- a) energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii,
- b) biogazu rolniczego,
- c) ciepła

– w instalacjach odnawialnego źródła energii” [art. 1 ust. 1 pkt 1 i pkt 2 uoże].

Pozyskiwanie wodoru z biomasy może następować przez wydzielenie go z gazów powstających w trakcie naturalnych procesów gnilnych i fermentacji.

Ustawa o odpadach „określa środki służące ochronie środowiska, życia i zdrowia ludzi przez zapobieganie powstawaniu odpadów i zmniejszenie ich ilości oraz negatywnego wpływu wytwarzania odpadów i gospodarowania nimi, a także przez zmniejszenie całkowitego wpływu użytkowania zasobów oraz poprawę efektywności takiego użytkowania, w celu przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym” [art. 1 uod]. Gospodarka odpadami, to system bardzo skomplikowany. Możliwości pozyskania wodoru pojawiają się przy termicznym przekształcaniu odpadów oraz przy ich składowaniu (ryc. 1).



Ryc. 1. Gospodarka odpadami

Źródło: opracowanie własne na podstawie ustawy o odpadach

## Pozyskiwanie wodoru z biomasy

Procesy gnilne powodują naturalny rozkład biomasy. W ten sposób powstaje biogaz, który może być źródłem energii oraz wodoru.

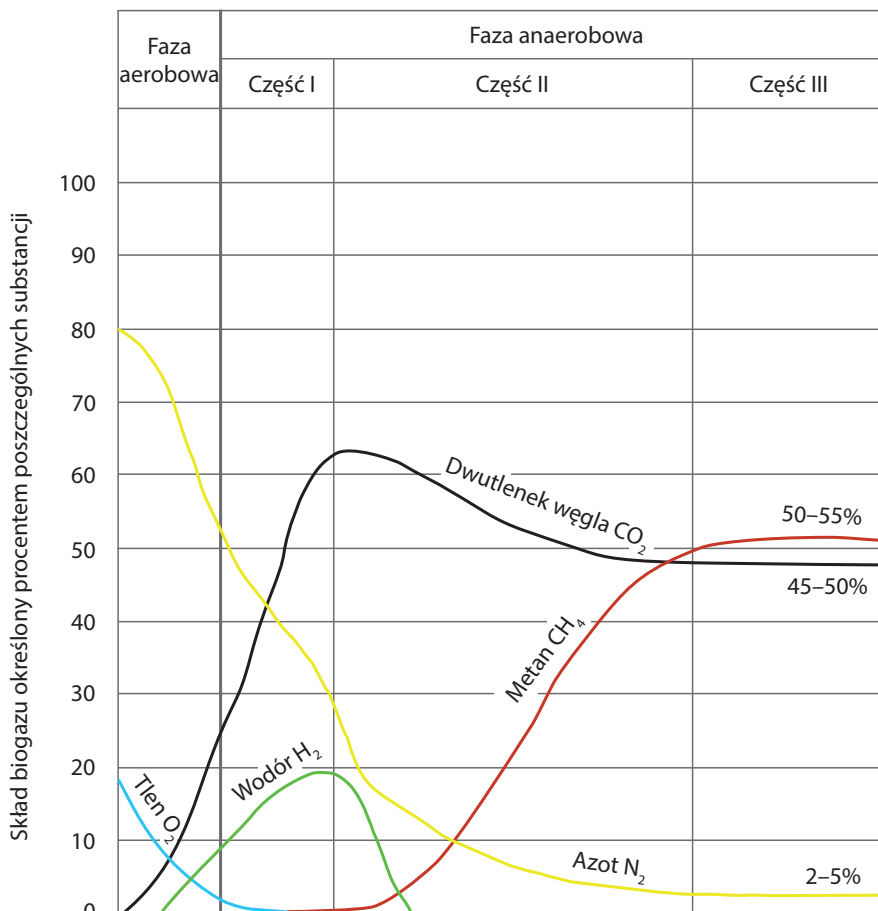
Biogaz, to „gaz uzyskany z biomasy, w szczególności z instalacji przeróbki odpadów zwierzęcych lub roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów” [art. 2 pkt 1 uoże].

Biogaz rolniczy, to „gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, lub biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż zaewidencjonowane jako rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu pozyskanego z surowców pochodzących ze składowisk odpadów, a także oczyszczalni ścieków, w tym zakładowych oczyszczalni ścieków z przetwórstwa rolno-spożywczego, w których nie jest prowadzony rozdział ścieków przemysłowych od pozostałych rodzajów osadów i ścieków” [art. 2 pkt 2 uoże].

Z powyższego wynika, że pojęcie biogaz jest bardzo szerokie. Rozróżnia się biogaz rolniczy, biogaz pozyskany ze składowisk odpadów oraz biogaz pozyskany z oczyszczalni ścieków. Można domniemywać, że biogaz ze składowisk odpadów to gaz składowiskowy w rozumieniu ustawy o odpadach, o czym poniżej.

Biomasa rozkłada się w temperaturze otoczenia na skutek znanych w przyrodzie procesów gnilnych i fermentacyjnych. Czas rozkładu jest zróżnicowany i zależy od wielu czynników. Nie sposób go jednoznacznie określić. Jedne procesy rozkładu trwają kilka tygodni, inne kilka lat. Powstaje w ten sposób biogaz, w skład którego wchodzi metan ( $\text{CH}_4$ ), dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ), tlen ( $\text{O}_2$ ), azot ( $\text{N}_2$ ) i wodór ( $\text{H}_2$ ) (ryc. 2). Wodór można wyodrębnić z biogazu za pomocą technologii zwanej rafinacją (patrz Słownik [Shahbaz i in. 2020; Babcock & Wilcox; Membrane Technology and Research, Inc. (MTR)]). Traktowany jak źródło energii ma kolor biały (ryc. 3). Jednakże istnieją poważne wątpliwości czy można go stosować jako paliwo, z uwagi na szczątkowe zanieczyszczenia. Ich obecność może powodować stopniowe zatrucie ogniów paliwowych i z biegiem czasu utratę ich efektywności lub awarie.

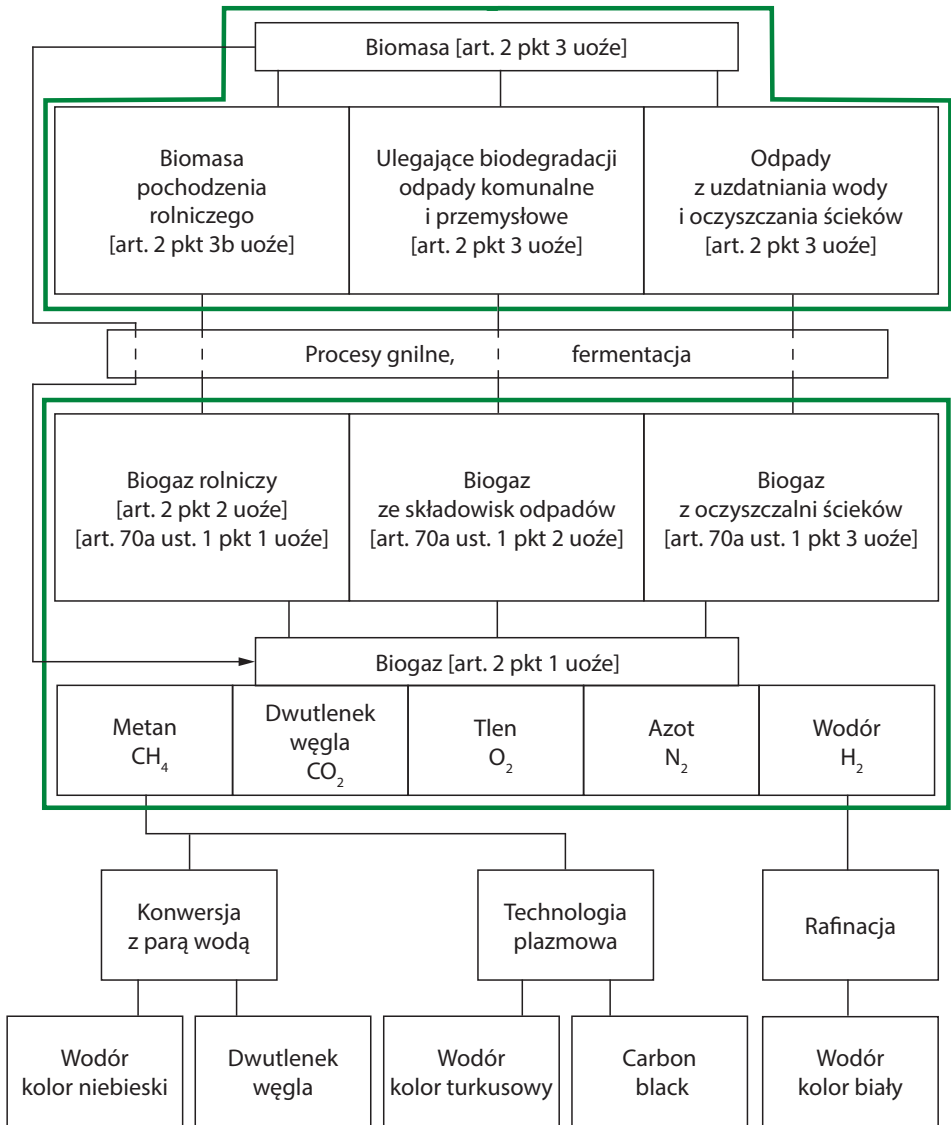
Ponadto wodór da się uzyskać z będącego składnikiem biogazu metanu. Obecnie znanych jest szereg technologii, np. konwersja metanu z parą wodną (patrz Słownik). Ta technologia z jednej strony prowadzi do pozyskania wodoru, z drugiej redukuje wydzielanie metanu do atmosfery, a więc wpisuje się w strategię ograniczania emisji gazów cieplarnianych [Ziaka, Vasileiadis 2013; Pham Minh i in. 2018]. Redukcji metanu poświęca się więcej uwagi niż redukcji dwutlenku węgla, ze względu na brak możliwości jego wychwytywania przez rośliny lub magazynowania. Alternatywą jest użycie technologii plazmowej do rozbicia metanu na wodór i tzw. carbon black (patrz Słownik [Timmerberg, Kaltschmitt, Finkbeiner 2020]). Wodór pozyskany z metanu za pomocą konwersji z parą wodną ma kolor niebieski, a pozyskany za pomocą technologii plazmowej ma kolor turkusowy (ryc. 3).



Fazy rozkładu biomasy – procesy gnilne, fermentacja

Ryc. 2. Rozkład biomasy

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Enviromental Protection Agency (EPA)



Ryc. 3. Biogaz jako źródło wodoru

Źródło: opracowanie własne na podstawie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz danych Environmental Protection Agency (EPA)

## Pozyskiwanie wodoru z odpadów podlegających składowaniu

Przetwarzanie odpadów ma polegać głównie na odzysku. Składowanie należy traktować jako ostateczność (ryc. 1). Charakterystyka odpadów przekazywanych na składowiska musi zawierać m.in. „oświadczenie o braku możliwości odzysku, w tym recyklingu odpadów” [art. 110 ust. 2 pkt 1 ppkt 'i' uod].

Składowanie odpadów odbywa się:

- „na składowisku odpadów” [art. 103 ust. 1 pkt 1 uod];
- „w podziemnym składowisku odpadów, o którym mowa w ustawie (...) Prawo geologiczne i górnicze” [art. 103 ust. 1 pkt 2 uod];
- „w obiekcie unieszkodliwiania odpadów wydobywczych, o którym mowa w ustawie (...) o odpadach wydobywczych” [art. 103 ust. 1 pkt 3 uod].

Składowisko odpadów, to „obiekt budowlany przeznaczony do składowania odpadów” [art. 3 ust. 1 pkt 25 uod]. Wyróżnia się trzy typy składowisk. Mamy składowiska odpadów niebezpiecznych, składowiska odpadów obojętnych oraz składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne [art.103 ust. 2 uod]. Na ostatnim z wymienionych rodzajów składowisk mogą być składowane odpady komunalne, odpady inne niż niebezpieczne i obojętne oraz niektóre stałe odpady niebezpieczne [art. 107 ust. 1]. Szczegółowe zasady tworzenia, funkcjonowania i likwidacji składowisk określa rozporządzenie w sprawie składowisk odpadów (rozp.so).

Zarówno w ustawie o odpadach, jak i w powyższym rozporządzeniu występuje pojęcie gaz składowiskowy. „Składowisko odpadów, na którym przewiduje się składowanie odpadów ulegających biodegradacji, wyposaża się w instalację do odprowadzania gazu składowiskowego, zaprojektowaną w sposób zapewniający jej prawidłowe funkcjonowanie w trakcie eksploatacji składowiska oraz przez co najmniej trzydzieści lat od dnia jego zamknięcia” [§ 8 ust. 1 rozp.so]. W decyzji o pozwoleniu na budowę takiego składowiska określa się m.in. sposób „gromadzenia, oczyszczania i wykorzystywania lub unieszkodliwiania gazu składowiskowego” [art.127 ust. 4 pkt 8 uod]. Dla tego gazu jest wymagany monitoring metanu ( $\text{CH}_4$ ), dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz tlenu ( $\text{O}_2$ ) [§ 21 ust. 2 rozp.so].

Odpady ulegające biodegradacji – to „odpady, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów” [art. 3 ust. 1 pkt 10 uod]. Takimi odpadami są niektóre frakcje odpadów komunalnych, np. bioodpady, odpady żywności [art. 3 ust. 1 pkt 1, pkt 7 i pkt 13a uod].

Odpady ulegające biodegradacji mogą być składowane na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne [art.107 ust. 1 uod]. Dotyczy to wyłącznie odpadów, które nie zostały zebrane selektywnie. Prawo zakazuje składowania na składowisku odpadów selektywnie zebranych, w szczególności ulegających biodegradacji [art.122 ust. 1 pkt 5a i pkt 6 uod].

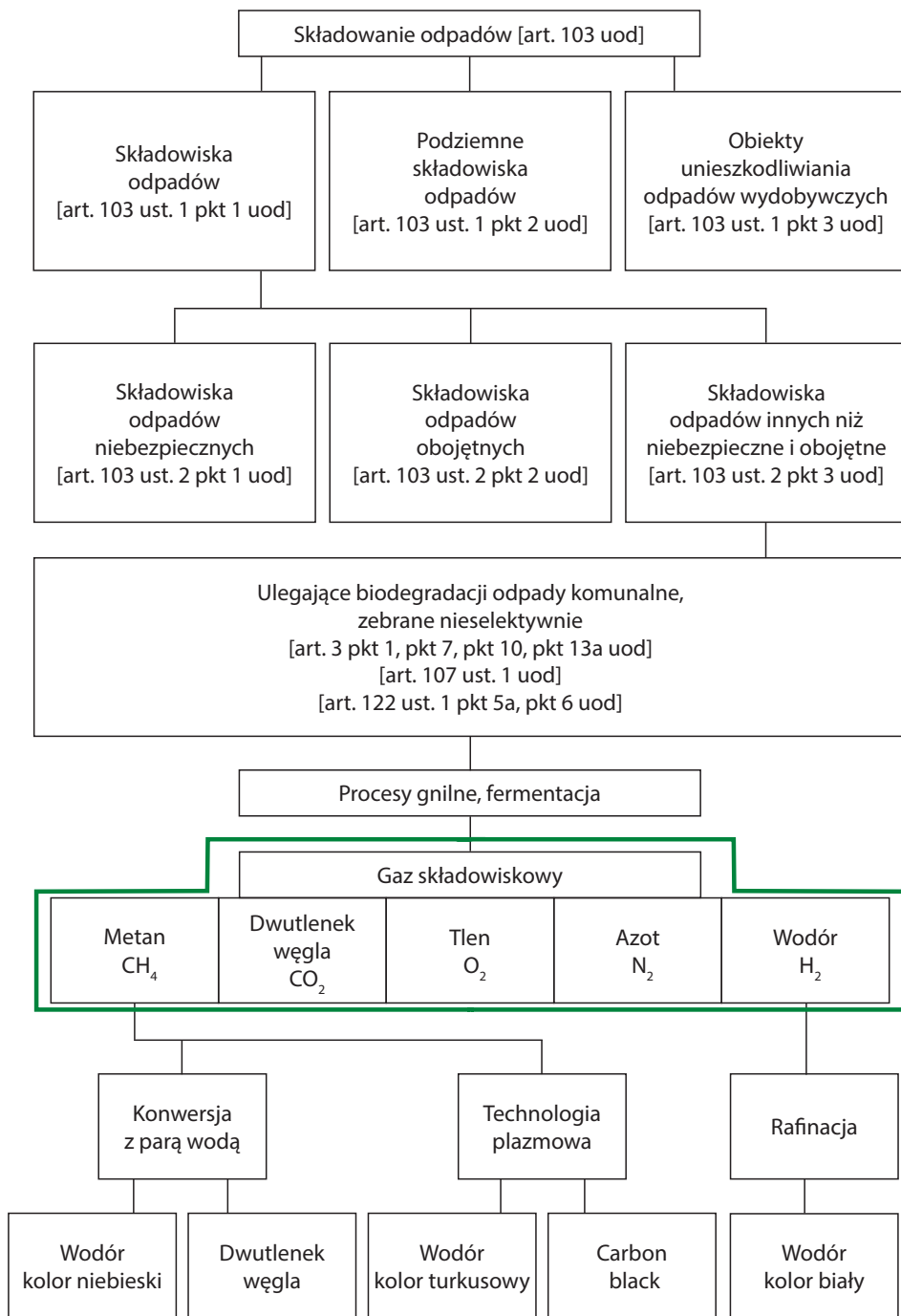
Gaz składowiskowy „poddaje się obróbce, w szczególności oczyszcza się i wykorzystuje do celów energetycznych, a jeżeli jest to niemożliwe – spala w pochodni” [§ 8 ust. 2 rozp.so]. W praktyce, ten gaz używa się do napędzania małych elektrowni,



wybudowanych bezpośrednio przy składowiskach. W skrajnych przypadkach – „spala w pochodni.” Skład chemiczny gazu składowiskowego jest zbliżony do biogazu, więc może być on wykorzystywany do produkcji wodoru, przy zastosowaniu technologii jak do pozyskiwania wodoru z biogazu [EPA]. Można domniemywać, że biogaz pozyskany ze składowisk odpadów w rozumieniu ustawy o odnawialnych źródłach energii jest tożsamy z gazem składowiskowym, w rozumieniu ustawy o odpadach (ryc. 4). Podkreślenia wymaga brak jednoznacznych uregulowań prawnych.

Nasuwa się pytanie, czy pozyskiwanie wodoru z gazu składowiskowego jest zgodne z prawem? W tym kontekście warto przeanalizować definicję pojęcia unieszkodliwienie odpadów – jest to „proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii” [art. 3 ust. 1 pkt 30 uod]. Cytowany przepis wyraźnie stanowi, że przy unieszkodliwianiu można ‘coś’ odzyskać. Tym czymś może być wodór.

Ustawa o odpadach zakazuje „zbierania lub przetwarzania odpadów na składowisku odpadów w inny sposób niż składowanie odpadów, z wyjątkiem przypadków określonych w przepisach wydanych na podstawie art. 124 ust. 6” [art. 104 ust. 2 uod]. Art. 124 ust. 6 ustawy stanowi, że minister właściwy do spraw klimatu określi, w drodze rozporządzenia, wymagania dotyczące budowy i prowadzenia składowiska odpadów, „kierując się specyficznymi wymaganiami dotyczącymi składowania niektórych rodzajów odpadów”. Powyższy przepis stał się podstawą wydania rozporządzenia w sprawie składowisk odpadów, które stanowi, że gaz składowiskowy „poddaje się obróbce, w szczególności oczyszcza się i wykorzystuje do celów energetycznych” [§ 8 ust. 2 rozp.so]. W świetle powyższego, wydaje się, że pozyskiwanie z gazu składowiskowego wodoru, który następnie stanie się źródłem energii, nie narusza przepisów ustawy o odpadach.



Ryc. 4. Gaz składowiskowy jako źródło wodoru

Źródło: opracowanie własne na podstawie ustawy o odpadach oraz danych Environmental Protection Agency (EPA)

## Pozyskiwanie wodoru z odpadów podlegających termicznemu przekształcaniu

Termiczne przekształcanie odpadów – to:

- „spalanie odpadów przez ich utlenianie” [art. 3 ust. 1 pkt 29 ppkt ‘a’ uod];
- inne procesy, w tym piroliza, „zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów są następnie spalane” [art. 3 ust. 1 pkt 29 ppkt ‘b’ uod].

Termiczne przekształcanie odpadów niebezpiecznych oraz stałych odpadów komunalnych stanowi proces unieszkodliwiania [art. 158 ust. 1 pkt 1 i pkt 2 uod].

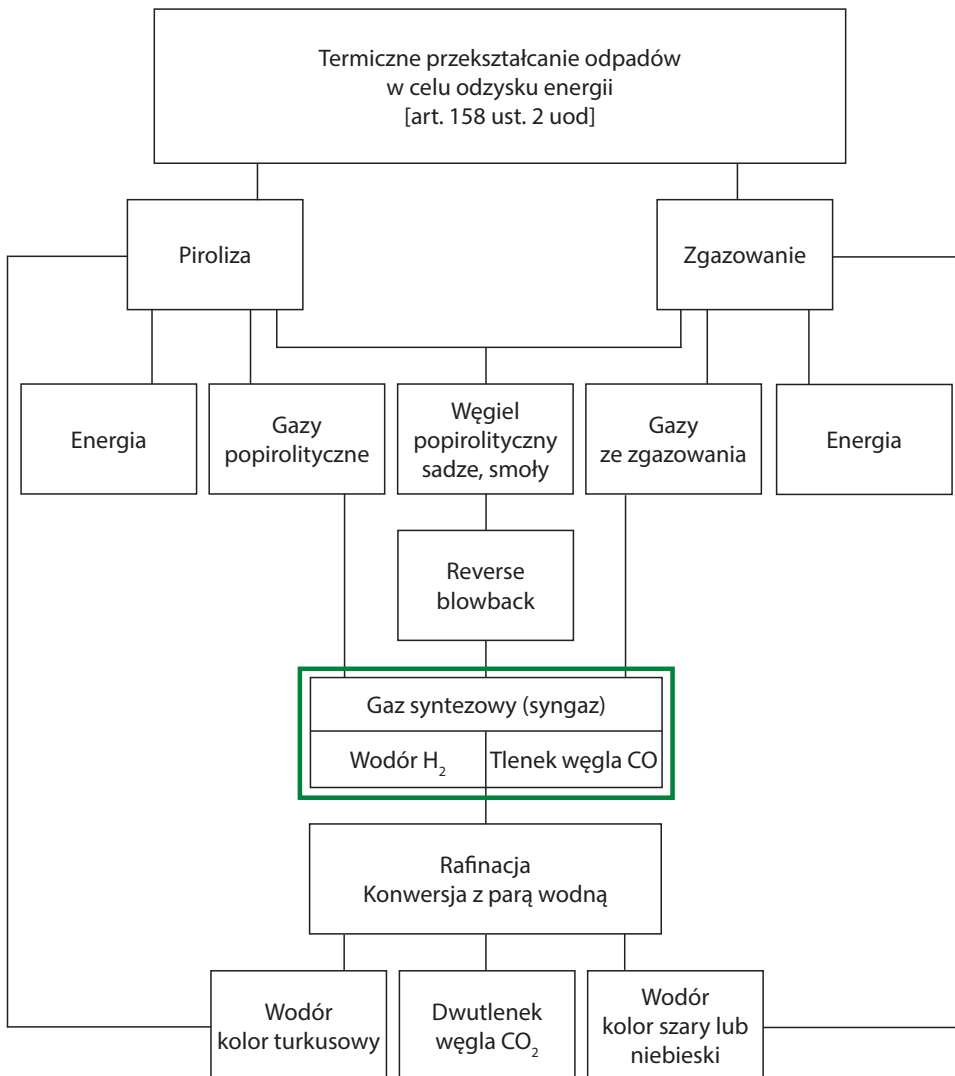
Termiczne przekształcanie, w celu odzysku energii odpadów opakowaniowych, odpadów innych niż niebezpieczne, stałych odpadów komunalnych stanowi proces odzysku [art. 158 ust. 2 uod].

„Zakazuje się przekazywania do termicznego przekształcania odpadów selektywnie zebranych w celu przygotowania ich do ponownego użycia lub recyklingu, z wyjątkiem odpadów powstających w wyniku dalszego przetwarzania odpadów selektywnie zebranych, jeżeli w tym przypadku termiczne przekształcanie zapewnia wynik najlepszy dla środowiska, zgodnie z hierarchią sposobów postępowania z odpadami” [art. 158 ust. 2a uod].

Podczas termicznego przekształcania odpadów w procesach pirolizy lub zgazowania (patrz Słownik) powstaje energia oraz produkty uboczne: gazy popirolityczne lub gazy powstające na drodze zgazowania, tzw. węgiel popirolityczny, sadze i smoły. Część z tych pozostałości to wartościowe związki chemiczne np. cykliczne węglowodory, które są sprzedawane po odpowiednim oczyszczeniu. Powyższe produkty uboczne mogą być również użyte do produkcji tzw. gazu syntezowego (w skrócie syngaz) oraz do wytwarzania wodoru. Do współczesnych procesów pirolizy i zgazowania używa się techniki zwanej reverse blowback (patrz Słownik), mającej za zadanie ponowne wprowadzenie pozostałości takich jak węgiel popirolityczny, sadza i smoła do komory reaktora. W ten sposób powstaje syngaz – mieszanka wodoru ( $H_2$ ) i tlenku węgla (CO), w której stosunek tych składników mieści się w szerokim przedziale (1–3, 5:1) [Kobayashi 2021].

Z syngazu można wyizolować wodór za pomocą rafinacji. Dla pozyskania większych ilości tego pierwiastka tlenek węgla jest dalej poddany konwersji z parą wodną. Produktem ubocznym wyżej wymienionych procesów będzie dwutlenek węgla [Potemkin i in. 2020]. Powstały wodór na drodze procesów zgazowywania ma kolor szary lub niebieski w zależności czy użyty został wychwyty dwutlenku węgla na końcu procesu. Dla procesów pirolizy kolor wodoru jest turkusowy (ryc. 5).

Wydaje się, że pozyskiwanie z gazu syntezowego wodoru, który następnie stanie się źródłem energii, nie narusza przepisów ustawy o odpadach.



Ryc. 5. Gaz syntezowy jako źródło wodoru

Źródło: opracowanie własne na podstawie ustawy o odpadach oraz literatury: Kobayashi 2021; Potemkin i in. 2020

## Podsumowanie

Pozyskiwanie wodoru z biomasy i niektórych odpadów wymaga dalszych badań. Tylko niektóre z opisanych metod pozwalają na wytworzenie wodoru w kolorze niebieskim (ryc. 3–5). Zawsze produktem ubocznym jest gaz cieplarniany – dwutlenek węgla. Przy czym w przypadku wodoru powstającego z biogazu i gazu składowiskowego dwutlenek węgla, w dokumentach Unii Europejskiej, jest postrzegany jako neutralny klimatycznie. Oficjalne wyjaśnienie tego paradoksu stanowi: „Drzewa i inne rośliny pobierają CO<sub>2</sub> z atmosfery, a następnie uwalniają go w procesie przemiany materii, nie zmieniając tym samym poziomu CO<sub>2</sub> w atmosferze. Dla porównania, przy spalaniu paliw kopalnych do atmosfery dostaje się, więziony przez miliony lat, dwutlenek węgla, stając się poważnym obciążeniem dla całej planety” [cordis.europa]. Nie wiadomo jak postrzegany jest dwutlenek węgla, będący produktem ubocznym pozyskiwania wodoru z gazu syntezowego.

Wydaje się, że z przyczyn praktycznych wodór będzie pozyskiwany z biomasy i powstającego z niej biogazu a nie z odpadów. Ustawa o odpadach nakazuje redukcję ich wytwarzania, a składowanie traktuje jak ostateczność. Oznacza to, że może nie być wystarczającej ilości odpadów, aby wytwarzanie z nich wodoru było opłacalne. Uściśleń wymagają również kwestie prawne z tym związane. Wodór jako nośnik energii wciąż pozostaje dla współczesnej techniki bardziej wyzwaniem przyszłości niż codzienna rzeczywistością.

## Materiały źródłowe

### Literatura

- Kobayashi M., 2020, *Dry Syngas Purification Processes for Coal Gasification Systems*, Elsevier Science Publishing Co Inc (Verlag).
- Pham Minh D., Tan Ji Siang, Dai-Viet N. Vo, Thanh Son Phan, Ridart C., Nzihou A., Grouset D., 2018, *Hydrogen production from biogas reforming: an overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane*, Hydrogen Supply Chains, Academic Press, <https://imt-mines-albi.hal.science/hal-01876512>
- Potemkin D.I., Uskov S.I., Gorlova A.M., Kirillov V.A., Shigarov A.B., Brayko A.S., Rogozhnikov V.N., Snytnikov P.V., Pechenkin A.A., Belyaev V.D., Pimenov A.A., Sobyenin V.A., 2020, *Low-temperature steam conversion of natural gas to methane-hydrogen mixtures*, Catalysis in Industry, 12, 3, <https://doi.org/10.1134/S2070050420030101>, s. 244–249.
- Shahbaz M., Al-Ansari T., Aslam M., Khan Z., Inayat A., Athar M., Raza Naqvi S., Ahmed M.A., McKay G., 2020, *A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation*, International Journal of Hydrogen Energy, 45, 30, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.009>, s. 15166–15195.
- Timmerberg S., Kaltschmitt M., Finkbeiner M., 2020, *Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs*, Energy Conversion and Management: X 7, 100043, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100043>

Wereda B., Polak E., 2022, *Kierunki rozwoju energetyki w województwie mazowieckim w kontekście polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej*, MAZOWSZE Studia Regionalne, 40, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego, Warszawa, s. 27–54.

Ziaka Z., Vasileiadis S., 2013, *Pretreated Landfill Gas Conversion Process via a Catalytic Membrane Reactor for Renewable Combined Fuel Cell-Power Generation*, Journal of Renewable Energy, 1, <https://doi.org/10.1155/2013/209364>, s. 1–8.

### Źródła prawa

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (t.j. z dnia 3 marca 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 699 z późn. zm.), w skrócie uod.

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (t.j. z dnia 23 czerwca 2022 r. (Dz.U. z 2022 r. poz. 1378), w skrócie uoże.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (t.j. z dnia 6 sierpnia 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 1902), w skrócie rozp.so.

### Strony internetowe

*A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*, 2020, European Commission, Brussels, [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2020/09/hydrogen\\_strategy.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2020/09/hydrogen_strategy.pdf) [dostęp: 1.02.2023].

Babcock & Wilcox, <https://www.babcock.com> [dostęp: 1.02.2023].

Cordis.europa, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/75525/brief/pl> [dostęp: 1.02.2023].

Environmental Protection Agency (EPA), <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas> [dostęp: 1.02.2023].

Membrane Technology and Research, Inc. (MTR), <https://www.mtrinc.com/> [dostęp: 1.02.2023].

## Słownik pojęć

Autorzy zastrzegają, że pojęcia umieszczone w Słowniku mogą być nieco inaczej rozumiane w innych publikacjach. Poniższe definicje odnoszą się wyłącznie do niniejszego artykułu.

**Carbon black** – sadza węglowa składająca się z czystego parakrystalicznego (pół-amorficznego) węgla. Obecnie stosowany jako pigment i dodatek do różnego rodzaju gum. Rozważany jako dodatek do baterii litowo-jonowych w celu polepszenia ich właściwości.

**Konwersja** (z parą wodną) – znana także jako reforming z parą wodną. Proces, w którym metan jest poddawany działaniu pary wodnej w warunkach wysokiej temperatury (700–1100°C) i w obecności katalizatora metalicznego. Produktem takiego procesu jest syngaz – mieszanina tlenu węgla i wodoru.

**Piroliza** – proces wysokotemperaturowy (ok. 300–1200°C), w którym dany materiał jest poddawany rozkładowi termicznemu bez dostępu tlenu i pod umiarkowanym ciśnieniem kilku atmosfer. Temperatura zależy od materiału i warunków procesu. Przykładem pirolizy jest np. produkcja węgla drzewnego.

**Rafinacja** – oczyszczanie danego związku/produktu z zanieczyszczeń (oczyszczanie – ang. *purification*), tudzież rozdzielenie go na poszczególne czynniki (rozdzielenie – ang. *separation*). Przykładem jest rafinacja ropy naftowej, gdzie następuje oczyszczenie ropy z zanieczyszczeń i rozdzielenie jej na poszczególne frakcje węglowodorowe.

**Reverse blowback** – w procesie chemicznym definiowany jest jako silny strumień gazów użyty do oczyszczenia komory reakcyjnej z przywartych zanieczyszczeń. Zanieczyszczenia ulegają spaleniu i w przypadku procesów wysokotemperaturowych mogą ulec reakcji.

**Technologia plazmowa** – poddanie danego związku chemicznego lub materiału działaniu wytworzonej plazmy, np. plazmy mikrofalowej lub z łuku elektrycznego. Efektem tego jest powstanie szeregu związków o różnym stopniu złożoności. Produkty takich procesów zależą od materiału/substratów, użytej plazmy, atmosfery gazowej itp. Mechanika takich procesów jest mało poznana ze względu na złożoność reakcji zachodzących w plazmie.

**Zgazowanie** – proces wysokotemperaturowy (ok. 800–2000°C) wykonywany w obecności pary wodnej lub tlenu, w którym następuje proces konwersji materiałów zawierających węgiel do gazu zawierającego m.in. wodór i lekkie węglowodory. I w zależności od konfiguracji procesu, dalszej konwersji gazu do wodoru i dwutlenku węgla. Proces ten może być prowadzony w ciśnieniu atmosferycznym lub w nadciśnieniu.

---

## Energy generation – hydrogen technologies. Hydrogen from biomass and waste

### ABSTRACT

For years, European Union policy has been geared towards promoting energy sources that do not degrade the environment. Hydrogen could be such an energy source.

The aim of this article is to familiarize readers with the methods of generating hydrogen from biomass and certain waste, and to determine its colour. In the European Union, different 'colours' are assigned to this element – green, pink, yellow, blue, turquoise, white, grey, brown and black. The colour depends on the source and method of extraction. Hydrogen, as an environmentally friendly energy source, should have green, pink or blue colour.

**Key words:** hydrogen, biomass, waste, renewable energy sources

---

---

**Maciej Siekierski**, dr hab. inż./PhD, DEng

Wydział Chemiczny Politechniki Warszawskiej / Faculty of Chemistry Warsaw University of Technology

e-mail: siekierski.m.s@gmail.com

**Piotr Ryś**, doktorant / graduate student

Wydział Chemiczny Politechniki Warszawskiej / Faculty of Chemistry Warsaw University of Technology

e-mail: piotr.rys.dokt@pw.edu.pl

**Anna Wieczorek**, dr/PhD

urbanista, architekt / urban planner, architect

e-mail: ajwieczorek@wp.pl



cytacja:

Siekierski M., Ryś P., Wieczorek A., 2023, *Pozyskiwanie energii – technologie wodorowe. Wodór z biomasy i odpadów*, MAZOWSZE Studia Regionalne, 44, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego w Warszawie, Warszawa, s. 47–62, <https://www.doi.org/10.21858/msr.44.03>