



Łukasiewicz

Instytut Organizacji i Zarządzania
w Przemśle ORGMASZ



BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

**II - INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA
TECHNOLOGII WODOROWYCH**

- OGÓLNE ZAGADNIENIA INŻYNIERYJNE

BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

II

INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA TECHNOLOGII WODOROWYCH – OGÓLNE ZAGADNIENIA INŻYNIERYJNE

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Recenzenci: prof. dr. hab. inż. Piotr Wolański, dr inż. Katarzyna Stec, dr inż. Renata Kulesza, dr hab. inż. Grzegorz Wojtasiewicz, dr inż. Antoni Migdał, dr inż. Piotr Wieczorek, Damian Wijatyk, dr inż. Kamil Kulesza

Kierownik projektu: dr Katarzyna Iwińska

Zespół projektu: dr Katarzyna Iwińska, dr inż. Kamil Kulesza, dr hab. Michał Wróblewski, Joanna Grudowska

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa” nr projektu NdS 545480/2022/2022, kwota dofinansowania 1 410 152 zł, całkowita wartość projektu 1 410 152 zł.



Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemysle ORGMASZ
ul. Żelazna 87 00-879 Warszawa

SPIS TREŚCI

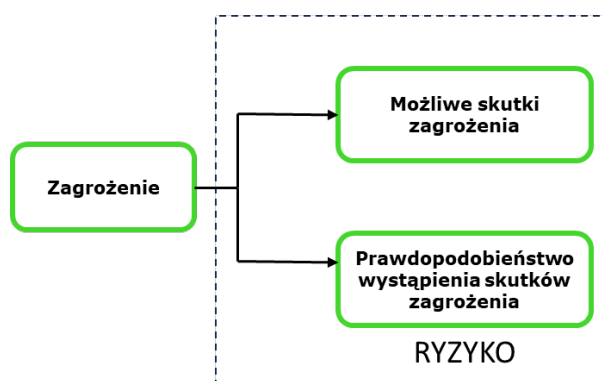
1. Wstęp – cel opracowania	3
2. Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa, przegląd stanu techniki, geneza, procedury... 3	
2.1. Geneza i znaczenie wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.....	4
2.2. Analiza obowiązujących ogólnych przepisów prawa, standardów, wytycznych oraz kryteriów oceny.....	6
2.3. Techniki inżynierskie w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	6
2.4. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	17
2.5. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w obszarze celów.....	21
2.6. Analiza ilościowa w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.....	22
2.7. Technologie wodorowe, efekt środowiskowy	22
2.8. Techniki inżynierskie: scenariusze kryzysowe	25
3. Podsumowanie	29
Bibliografia	30

1. WSTĘP – CEL OPRACOWANIA

Można przyjąć, że bezpieczeństwo jest to zapewnienie akceptowalnego poziomu ryzyka w poszczególnych obszarach, zdrowia, życia, strat w majątku, środowisku naturalnym etc. Tak rozumiane bezpieczeństwo jest to iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia kryzysowego oraz skali strat, które może generować brak uwzględnienia danego czynnika ryzyka. Bezpieczeństwo procesowe jest to ogół zagadnień dotyczących obszaru technologicznego. Natomiast bezpieczeństwo funkcjonalne jest podzbiorem tego zagadnienia i obejmuje aktywność zapobiegania potencjalnym zagrożeniom poprzez odpowiednio zaprojektowane oraz eksploatowane produkty i procesy.

Bezpieczeństwo procesowe obejmuje trzy główne etapy z cyklu życia produktu czy procesu. Są to: faza projektowa, eksploatacyjna oraz likwidacyjna¹.

Schemat dotyczący identyfikacji zagrożeń przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1 Identyfikacja zagrożeń².

Właściwości fizykochemiczne wodoru, krytyczne ze względu na bezpieczeństwo, to głównie³:

- palność i wybuchowość,
- przenikalność i związana z nią kruchość wodorowa,
- ekstremalnie niskie temperatury,
- wysokie ciśnienie przechowywania i transportu,
- mieszanie się wodoru z innymi czynnikami,
- właściwości faz skupienia wodoru (gazowa, ciekła, błoto wodorowe).

WODOROWA INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA, PRZEGLĄD STANU TECHNIKI, GENEZA, PROCEDURY

Wodór wymaga stosowania dokładnych analiz bezpieczeństwa na każdym etapie, tj. produkcji, transportu, przechowywania i spalania (głównie, jako substrat reakcji). W poniższym rozdziale przedstawione zostały zasady wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w ujęciu ogólnym. Należy jednak dodać, że do całkowitego usystematyzowania wodorowej inżynierii bezpieczeństwa niezbędne jest dostosowanie obowiązującego prawa do szybko rozwijających się technologii wodorowych.

Wodór wymaga stosowania dokładnych analiz bezpieczeństwa na każdym etapie, tj. produkcji, transportu, przechowywania i spalania (głównie, jako substrat reakcji). W poniższym rozdziale przedstawione zostały zasady wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w ujęciu ogólnym. Należy jednak dodać, że do całkowitego usystematyzowania wodorowej

inżynierii bezpieczeństwa niezbędne jest dostosowanie obowiązującego prawa do szybko rozwijających się technologii wodorowych.

1.1. GENEZA I ZNACZENIE WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Wodór ze względu na swoją charakterystykę wymaga uważnego podejścia do kwestii bezpieczeństwa. Obecna sytuacja legislacyjna nie wyczerpuje zagadnień bezpieczeństwa, ponieważ w przepisach istnieją liczne luki, jednak trwają prace nad uregulowaniem polskiego i europejskiego otoczenia prawnego w tym obszarze.

Na uwagę zasługują tutaj powołanie w 2017 roku przez organizację *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking* (FCH 2 JU) Europejskiego Panelu Bezpieczeństwa Wodorowego (EHSP), jako odpowiedź na konieczność wypracowania wodorowej kultury bezpieczeństwa. FCH 2 JU jest organizacją publiczno-prywatną wspierającą badania, rozwój technologiczny oraz demonstracje związane z wodorowymi technologiami energetycznymi, głównie w obszarze ogniw paliwowych (RTD^a)⁴ (w 2021 r. powołano „Clean Hydrogen Partnership”, jako kontynuatora działań⁵). Jednym z wniosków z prac finansowanych z tego programu są informacje dotyczące bezpieczeństwa użytkownika ogniw paliwowych w zamkniętym pomieszczeniu. Bezpieczeństwo wodorowe wymaga szczególnej uwagi w otoczeniu zamkniętym ze względu na możliwość wystąpienia wysokich stężeń wodoru w powietrzu, które mogą być przyczyną wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych. Prace nad bezpieczeństwem wodorowym w niektórych obszarach są dopiero rozwijane.

Wspomniane już obszary właściwości fizykochemicznych wodoru, wymagające zastosowania inżynierii bezpieczeństwa, to:

- palność i wybuchowość – ze względu na niską temperaturę oraz energię zapłonu,
- mały rozmiar cząsteczki i związane z nim zjawiska korozyjne, tzw. kruchość wodorowa – wodór, jako pierwiastek o najniższej masie atomowej ma silne właściwości dyfuzyjne m.in. do ścian zbiorników (rysunek 2), implikując w ten sposób zjawisko korozji powodowanej przez atomy wodoru w obszarze sieci krystalicznej żelaza. Wynikający z tego wzrost ciśnienia oraz naprężeń w strukturze stali, może powodować zmniejszenie plastyczności, pękanie naprężeniowo-siarczkowe struktury, powstawianie pęcherzy wodorowych (rybie oczy, płatki śnieżne)⁶, czy zjawisko tzw. wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA^b), które polega na uszkodzeniu międzykrystalicznego materiału urządzeń narażonych na działanie wodoru w podwyższonych temperaturach (>200°C)⁷,
- niskie temperatury w przypadku skroplonego wodoru, skraplanie gazów jest podstawowym sposobem uzyskiwania niskich temperatur. Technologie kriogeniczne^c wymagają stosowania inżynierii bezpieczeństwa ze względu na oddziaływanie niskich temperatur na otoczenie,
- wysokie ciśnienie przechowywania i transportu (w przypadku wodoru sprężonego) – infrastruktura związana z rozwiązaniami ciśnieniowymi, może powodować ryzyka związane z rozszczelnieniem instalacji,

^a RTD – z ang. Research, Technology Development, Demonstration.

^b HTHA, z ang. High Temperature Hydrogen Attack.

^c kriogenika [gr. *krýos* 'mróz', *génos* 'pochodzenie'], technika wytwarzania i utrzymywania bardzo niskich temperatur, za umowną granicę przyjmuje się temperaturę 120 K (PWN).