



Łukasiewicz

Instytut Organizacji i Zarządzania
w Przemśle ORGMASZ



BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

V - INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA
TECHNOLOGII WODOROWYCH –
BEZPIECZEŃSTWO W OBSZARZE TRANSPORTU
I DYSTRYBUCJI WODORU

BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

V

INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA TECHNOLOGII WODOROWYCH – BEZPIECZEŃSTWO W OBSZARZE TRANSPORTU I DYSTRYBUCJI WODORU

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 Przemśle ORGMASZ
ul. Żelazna 87 00-879 Warszawa

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	2
1. Wstęp – cel opracowania	3
2. Analiza obowiązujących przepisów prawa, standardów, wytycznych oraz kryteriów oceny związanych z bezpieczeństwem	3
3. Definiowanie obszaru projektowego w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa i jego elementów	4
3.1. Definiowanie obszaru projektowego dotyczącego bezpieczeństwa, w przypadku transportu i dystrybucji wodoru podejście ogólne	4
3.2. Definiowanie obszaru projektowego dotyczącego bezpieczeństwa, w przypadku transportu i dystrybucji wodoru ze względu na stan skupienia	4
4. Analiza podsystemów technicznych w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	5
4.1. Zagadnienia związane z oddziaływaniem na otoczenie	6
4.2. Metody minimalizowania zagrożeń oraz ich skutków	9
5. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	9
5.1. Zagadnienia dotyczące systemów technicznych	9
5.2. Zagadnienia związane z infrastrukturą i otoczeniem	10
6. Techniki inżynierskie, scenariusze kryzysowe	11
7. Podsumowanie	13
8. Bibliografia	14

1. WSTĘP – CEL OPRACOWANIA

Rozwój gospodarki wodorowej implikuje konieczność rozwoju i skalowania technik związanych z transportem i dystrybucją wodoru. Będzie się to wiązało z poszukiwaniem nowych i rozwojem znanych metod w tym zakresie. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie zagadnień dotyczących bezpieczeństwa związanego z tymi metodami, aby możliwe było łatwe wyszukanie nowych zagrożeń.

Transport wodoru można realizować w postaci sprężonej oraz skroplonej. Wiąże się on ściśle z obszarem magazynowania wodoru. Dlatego kwestie związane z bezpieczeństwem transportu wodoru należy rozpatrywać jako rozszerzenie zagadnień związanych z jego magazynowaniem. Ta kwestia dotyczy również stacji tankowania wodorem, mamy tutaj bowiem do czynienia zarówno z magazynowaniem, jak i transportem wodoru. Wszystkie te obszary z racji swojej charakterystyki i funkcji wymagają dobrze przemyślanych procedur bezpieczeństwa, które powinny być określone już na etapie projektowym.

Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 roku z perspektywą do 2040 roku¹ w kwestii zatłaczania wodoru do sieci dystrybucyjnej gazu ziemnego przewiduje dostosowanie wybranych odcinków sieci gazowej do przesyłu i dystrybucji wodoru domieszkowanego do gazu ziemnego. Z tego względu w niniejszym opracowaniu poruszono tematykę bezpieczeństwa w tym obszarze.

2. ANALIZA OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW PRAWA, STANDARDÓW, WYTYCZNYCH ORAZ KRYTERIÓW OCENY ZWIĄZANYCH Z BEZPIECZEŃSTWEM

Aspekty związane z przepisami prawa, standardami, wytycznymi oraz kryteriami oceny bezpieczeństwa opisano w raporcie nr 3, pt. „Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – bezpieczeństwo w obszarze otrzymywania wodoru.”.

W kwestii transportu wodoru istniejącą siecią dystrybucji gazu ziemnego brak jest jasnych wytycznych legislacyjnych i normatywnych. Powstałe prawo będzie musiało uwzględniać nie tylko kwestie logistyczne czy koncesyjne, ale również wpływ wodoru na bezpieczeństwo eksploatacyjne, np. żywotność tej sieci (np. określenie maksymalnych wielkości domieszek wodoru ze względu na jego właściwości).

W przypadku transportu i dystrybucji wodoru ustawy, normy i wytyczne należy traktować interdyscyplinarnie oraz stosować się do wytycznych jednostek odpowiedzialnych za dopuszczenia infrastruktury wodorowej do użytkowania.

3. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO W WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA I JEGO ELEMENTÓW

3.1. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO DOTYCZĄCEGO BEZPIECZEŃSTWA, W PRZYPADKU TRANSPORTU I DYSTRYBUCJI WODORU PODEJŚCIE OGÓLNE

Stacje tankowania wodorem posiadają w swojej infrastrukturze urządzenia związane zarówno z transportem, jak i magazynowaniem wodoru. Dodatkowo wyposażone mogą być w stacje elektrolizy wody. Elementy, które powinny być brane pod uwagę w definiowaniu obszaru projektowego, to przede wszystkim²:

- obszar elektrolizy (jeżeli występuje),
- system dostaw wodoru,
- sprężarki,
- zbiorniki wodoru wraz z oprzyrządowaniem,
- połączenia rurowe,
- dystrybutory.

Wodór może być transportowany z wykorzystaniem:

- butli ze sprężonym gazem - używanych w przypadku małego zapotrzebowania lub przyczep z butlami w wiązkach ze sprężonym gazem przeznaczonych do większych zapotrzebowań (zwłaszcza jeśli są wymagane okresowe dostawy),
- cystern do cieczy kriogenicznych - używane do obsługi większych ilości gazu, zwłaszcza jeśli wymagany są dostawy realizowane w sposób ciągły,
- rurociągów - transport wodoru gazowego do obszarów o dużym zapotrzebowaniu, takich jak rafinerie, zakłady chemiczne czy inne zakłady przemysłowe.

Zagrożenia związane z transportem odpowiadają zagrożeniom związanym z magazynowaniem wodoru w zbiornikach oraz zagrożeniom związanym z przesyłem gazu siecią dystrybucji dedykowanej dla gazu ziemnego. Dodatkowo w przypadku transportu wodoru z udziałem zbiorników występują zagrożenia związane z mobilnością tych rozwiązań.

3.2. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO DOTYCZĄCEGO BEZPIECZEŃSTWA, W PRZYPADKU TRANSPORTU I DYSTRYBUCJI WODORU ZE WZGLĘDU NA STAN SKUPIENIA

W przypadku dystrybucji i transportu wodoru występują te same obszary techniczne co w przypadku przechowywania wodoru. Jednak w przypadku transportu i dystrybucji należy dodatkowo rozważyć aspekty bezpieczeństwa związane z transportem:

- sloshing^a,
- wypadki komunikacyjne,
- katastrofy w ruchu lądowym,
- katastrofy w ruchu morskim,

Katastrofy w ruchu lądowym mogą być przyczyną zdarzeń niebezpiecznych o znacznym wpływie na otoczenie. Przykładem może tutaj być wypadek podczas manewrowania

^a Sloshing – zjawisko „chlupotania” w zbiorniku pod wpływem sił działających podczas transportu.

w obszarze przemysłowym ciężarówce transportującej wodór w 2007 roku. W przyczepie znajdowało się dziesięć butli wypełnionych wodorem pod ciśnieniem 17,2 MPa, który miał być przeładowywany do dwóch znajdujących się na miejscu zbiorników magazynowych. Zbiorniki te mogą pomieścić do 15 000 stóp sześciennych przechowywanych pod ciśnieniem 2000 psi, co odpowiada około 35 kg wodoru. Wypadek ten był śmiertelny oraz wyrządził znaczne zniszczenia w otaczającej infrastrukturze³. Wnioski pokontrolne zostaną przedstawione w dalszej części opracowania. Problem pogłębia się w przypadku transportu wodoru skroplonego.

Stan skupienia wodoru jest kluczowym elementem wpływającym na wodorową inżynierię bezpieczeństwa. Dla wodoru gazowego nie występują bowiem zagrożenia związane z niskimi temperaturami i wysokim ciśnieniem, które występują w transporcie i dystrybucji skroplonego wodoru.

4. ANALIZA PODSYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Nie występuje znormalizowane podejście do podziału systemów technicznych na podsystemy techniczne (TSS^b), w celu wykonania analizy ryzyka. Przyjmuje się, że proces podziału powinien obejmować możliwie wszystkie aspekty bezpieczeństwa wodorowego, a w szczególności⁴:

- TSS powinny być zrównoważone między ich indywidualnymi rozwiązaniami w odniesieniu do ich komplementarności i synergii z innymi TSS,
- TSS powinien stanowić wybór najnowocześniejszych rozwiązań w danej dziedzinie bezpieczeństwa wodorowego,
- sprawdzone narzędzia inżynierskie, w tym korelacje empiryczne i półempiryczne oraz narzędzia numeryczne, takie jak modele i kody CFD,
- TSS powinien być elastyczny, aby umożliwić aktualizację istniejących lub wykorzystanie nowych odpowiednich i zatwierdzonych metod odzwierciedlających najnowsze postępy w nauce i inżynierii bezpieczeństwa wodoru.

Podsystemy techniczne mogą być ujęte w następujący sposób:

- podsystem techniczny 1 Inicjacja uwalniania i dyspersji,
- podsystem techniczny 2: Zapłon,
- podsystem techniczny 3: Deflagracje i detonacje,
- podsystem techniczny 4: Pożary,
- podsystem techniczny 5: Wpływ na ludzi, konstrukcje i środowisko,
- podsystem techniczny 6: Techniki łagodzenia skutków,
- podsystem techniczny 7: Interwencja służb ratunkowych.

Dla systemów transportu i dystrybucji wodoru podsystemy techniczne można rozpatrywać w aspektach wynikających z: integralności mechanicznej i elektrycznej, lokalizacji (dla stacji tankowania wodorem), systemu detekcji wodoru, systemu wentylacji, systemu kontrolnego, systemu oczyszczania instalacji z wodoru, stosowania zasad BHP, szkoleń oraz dostępu do odpowiednich służb⁵.

^b TSS – z ang. Technical Sub System.

4.1. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z ODDZIAŁYWANIEM NA OTOCZENIE

Oddziaływanie na otoczenie aspektów technicznych związanych z wodorową inżynierią bezpieczeństwa jest podstawowym parametrem koniecznym do identyfikacji, już na etapie projektowym wodorowych rozwiązań procesowych. Na wczesnym etapie projektowym powinna być przeprowadzona analiza jakościowa (*QDR – qualitative design review*) identyfikująca potencjalne zagrożenia procesowe. Analiza ta powinna obejmować przynajmniej⁴:

- przegląd projektu technologicznego i architektonicznego,
- wyznaczenie celów w obszarze bezpieczeństwa,
- identyfikację zagrożeń związaną z wodorem i możliwe konsekwencje,
- opracowanie wstępne zagadnień bezpieczeństwa wodoru,
- określenie kryteriów akceptacji i metody analizy,
- sporządzenie scenariuszy wodorowych scenariuszy kryzysowych do analizy.

W analizach bezpieczeństwa konieczne jest objęcie pracami kwestii oddziaływania na otoczenie, tj. ludzi, środowisko naturalne oraz otaczającą infrastrukturę.

Zbiorniki ze sprężonym gazem

Tego typu systemy wiążą się z niższą inwestycją początkową i są dobrym rozwiązaniem, gdy wymagana jest niewielka ilość wodoru. Gazowy wodór może być transportowany po drogach w pojedynczych butlach, wiązkach lub mobilnych zbiornikach. Najpowszechniejsze materiały, z których wykonywane są butle to stal, aluminium, stopy lekkie i kompozyty. Wysokociśnieniowe zbiorniki mobilne mogą przewozić od około 400 do około 1000 kg. Zagrożenia związane z gazowym wodorem, to głównie możliwość wystąpienia pożaru, wybuchu oraz rozprzestrzeniania się chmury wodoru w niebezpiecznym stężeniu i objętości.

Ciekły wodór

Transport wodoru w stanie ciekłym jest bardziej ekonomiczny niż transport wodoru gazowego, gdy ilości do dystrybucji są duże. Jest to spowodowane większą gęstością cieczy w porównaniu ze stanem gazowym, co implikuje mniejszą objętość dla tej samej ilości materii. Cysterna kriogeniczna może pomieścić około 3500 kg ciekłego wodoru (LH2^c). W związku z tym mniejsza liczba ciężarówek potrzebna jest do transportu tej samej ilości H₂ w porównaniu ze sprężonym gazem. Ciekły wodór jest transportowany za pomocą zbiorników dwupłaszczowych, które poprawiają izolację termiczną minimalizującą jego parowanie. Takie dwupłaszczowe rozwiązanie jest bardzo efektywne energetycznie i skutkuje odparowaniem LH2 na poziomie od 0,1% do 0,3% dziennie⁶ (dla porównanie w przypadku LNG^d wskaźnik ten wynosi 0,1% do 0,8% dziennie⁷). Oprócz zagrożeń związanych z gazowym wodorem w przypadku ciekłego wodoru występują zagrożenia związane z niską temperaturą.

Rurociągi

Rurociągi są oczekiwanym systemem do obsługi przesyłu wodoru na dużą skalę. Wskazane są na krótkich dystansach. Rozważa się wykorzystanie sieci przeznaczonej do transportu gazu ziemnego jako istniejącej infrastruktury, która mogłaby być przeznaczona do transportu mieszanek gazu ziemnego i wodoru (tzw. blending). W przypadku transportu

^c LH2 – Liquid Hydrogen, wodór w stanie ciekłym.

^d LNG – Liquefied Natural Gas, skroplony gaz ziemny.

rurociągami zagrożenia za strony wodoru są tożsame z zagrożeniami występującymi przy gazowym wodorze, jednak należy podkreślić, że wodór może powodować uszkodzenia rurociągów stalowych (kruchość wodorowa), a co za tym idzie implikować zdarzenia kryzysowe związane z metanem.

Bezpieczna eksploatacja systemu rurociągów przesyłowych zależy od różnych czynników, które mogą wpływać na siebie nawzajem. Bezpieczny system przesyłu wodoru sieciami gazowymi, powinien być zaprojektowany z uwzględnieniem⁸:

- lokalnych uwarunkowań m.in. strefa sejsmiczna, charakterystyka gleby,
- obowiązujących przepisów dotyczących instalacji rurowych dotyczących konstrukcji mechanicznej (w tym ciśnienie znamionowe i grubość ścianki),
- warunków eksploatacji w odniesieniu do składu płynu, prędkości gazu, ciśnienia, temperatury i punktu rosy,
- doboru materiałów – metale,
- doboru materiałów niemetalicznych,
- krajowych przepisów ustawowych i wykonawczych odnoszących się ogólnie do gazociągów przesyłowych oraz w szczególności systemów wodorowych,
- standardów czystości dla obsługi,
- branżowych kodeksów postępowania dotyczących instalacji wodorowych,
- względów zagrożeń, takich jak łatwopalność systemów wodorowych.

Każdy nowy system rurociągów transportowych powinien być zaprojektowany, skonstruowany i obsługiwany w taki sposób, aby dodatkowe zagrożenie dla ludzi, mienia i środowiska było utrzymywane w dopuszczalnych granicach. W tym celu należy przeprowadzić analizę bezpieczeństwa na każdym nowym lub istniejącym systemie rurociągów, który charakteryzuje się znaczącymi modyfikacjami.

Zwykle poziom szczegółowości analizy bezpieczeństwa opiera się na gęstości zaludnienia wokół rurociągu, potencjalnej dotkliwości incydentu oraz na prawdopodobieństwie jego wystąpienia. Metodą zwykle stosowaną w ocenie bezpieczeństwa jest określenie indywidualnego ryzyka i wykazanie, czy mieści się ono w dopuszczalnych granicach. Lokalne jednostki dopuszczające instalację do użytku wyznaczają wytyczne dotyczące przeprowadzania analizy bezpieczeństwa. Typowy przykład pełnej oceny ryzyka dla obszarów gęsto zaludnionych może wyglądać następująco⁸:

Identyfikacja zagrożeń, które należy wziąć pod uwagę, to głównie:

- szkody spowodowane przez osoby trzecie, w tym zagrożenia terrorystyczne,
- stosowanie niekompatybilnych materiałów i urządzeń we wszystkich warunkach eksploatacji,
- kruchość wodorowa,
- korozja zewnętrzna spowodowana niewłaściwą ochroną katodową,
- nieszczelności na szczelinach zaworowych, uszczelkach,
- nadmierne ciśnienie w rurociągu,
- niewłaściwa procedura pasywacji,
- niewłaściwa eksploatacja i konserwacja rurociągu,
- obciążenia ponadnormatywne spowodowane osuwaniem się ziemi, powodziami, trzęsieniami ziemi, przejazdami drogowymi, liniami kolejowymi,
- wpływ innych obiektów, takich jak linie wysokiego napięcia, koleje elektryczne,
- uszkodzenia spowodowane anormalnym zdarzeniem na rurze równoległej,
- wypadek drogowy lub pożar w pobliżu nadziemnych części rurociągu,
- promieniowanie pożaru wentylacyjnego lub flary.

Środki łagodzące dla każdego zagrożenia należy określić środki łagodzące, takie jak:

- kontrola ingerencji osób trzecich,
- zwiększona grubość ścianki rury,
- badanie nieniszczące spoin,
- pasywacja rury,
- oznakowanie rurociągu,
- zawory odcinające,
- zawory odcinające nadmiar przepływu lub niskie ciśnienie,
- wykrywanie nieszczelności za pomocą bilansu masowego,
- pogłębienie rurociągu,
- zabezpieczenia fizyczne: powłoka lub obudowa betonowa, płyty betonowe,
- przekierowanie rurociągów,
- obniżenie ciśnienia roboczego rurociągu,
- procedury operacyjne, w tym: programy przeglądów, programy kontroli korozji, awaryjne planowanie, szkolenie personelu, informowanie osób trzecich, współpraca z władzami lokalnymi.

Dla ułatwienia analiz można przyjąć typowe scenariusze zdarzeń, np.:

- pełne otwarcie rurociągu w wyniku uszkodzenia,
- 50% pełnego otwarcia,
- mały wyciek (5% pełnego otwarcia).

Konsekwencją tych wydarzeń, które należy wziąć pod uwagę, jest uwolnienie wodoru, który natychmiast może zapalić się lub spontanicznie unosić się i rozpraszać na wolnym powietrzu z prawdopodobnym opóźnionym zapłonem.

Wybór modelu do symulacji skutków zdarzenia, należy wziąć pod uwagę następujące elementy, aby poprawnie skonfigurować symulację:

- spadek ciśnienia spowodowany dynamicznym przepływem w rurze,
- przejściowy reżim przepływu spowodowany dekompresją rury,
- prędkość gazu.

Stacje tankowania

Stacje tankowania wodoru dostarczają paliwo wodorowe o wysokiej czystości i wysokim ciśnieniu do pojazdów napędzanych ogniwami paliwowymi. Stacje wodorowe działają i są budowane dla pojazdów lekkich (osobowych) i ciężkich pojazdów (ciężarówki i autobusy).

Stacje tankowania wodoru dystrybuują sprężony wodór na dwóch poziomach ciśnienia, 700 bar dla samochodów osobowych i 350 bar dla samochodów ciężarowych, autobusów i wszystkich innych pojazdów⁹. Stacje mają na ogół to samo wyposażenie, ale rozkład funkcjonalny każdej stacji może być inny w zależności od tego, jak wodór jest produkowany, dostarczany, przechowywany i dystrybuowany.

Każda stacja obejmuje co najmniej:

- zbiorniki do przechowywania wodoru – w zależności od lokalizacji i pojemności, ciśnienia magazynowanego wodoru (niskie, średnie, wysokie) oraz formy wodoru (gazowy lub ciekły),
- sprężarkę – wodór jest sprężany w celu zmniejszenia objętości i zwiększenia ciśnienia. Sprężarka głównie służy do uzupełniania zasobnika buforowego.

W zależności od pojemności zbiornika buforowego mogą być używane sprężarki o różnych parametrach,

- chiller – agregat stosowany jest głównie do samochodów osobowych w celu zminimalizowania całego czasu tankowania. Wodór jest schłodzony do -40°C w oparciu o standardowy protokół tankowania,
- dystrybutor – Dystrybutory są podobne do dystrybutorów CNG.

4.2. METODY MINIMALIZOWANIA ZAGROŻEŃ ORAZ ICH SKUTKÓW

Szybki rozwój gospodarki wodorowej jest uzależniony od bezpieczeństwa procesowego i społecznego odbioru procesu tankowania, a co za tym idzie bezpieczny projekt stacji ma zasadnicze znaczenie. Filozofia bezpieczeństwa oznacza, że proces musi być z natury bezpieczny, a ryzyko musi być zminimalizowane. Akceptacja wodoru jako paliwa przyszłości jest silnie związana z publicznym zrozumieniem bezpieczeństwa i kosztów wodoru. Stacja tankowania wodoru powinna być zlokalizowana w taki sposób, aby zminimalizować ryzyko dla użytkowników, personelu obsługującego, mienia i środowiska na akceptowalnym poziomie.

Wyjątkowe właściwości wodoru, które sprawiają, że nadaje się on jako nośnik energii lub paliwo, wymagają odpowiednich środków technicznych i operacyjnym zapobiegającym awariom. Połączenie właściwości wodoru i zachowanie definiuje potencjalne zagrożenia, na jakie narażeni są operatorzy. Podstawowe zagrożenia związane z instalacjami wodorowymi można podzielić na następujące kategorie:

- ryzyko poparzenia, zapłonu, wybuchu,
- ryzyko nadciśnienia,
- ryzyko niskiej temperatury,
- kruchość wodorowa,
- działanie wodoru na organizm ludzki poprzez bezpośredni kontakt lub narażenie.

Stacja tankowania wodoru musi posiadać procedury pomiarowe zmniejszające ryzyko wystąpienia pożaru, detonacji, deflagrację i fal ciśnienia do akceptowalnego poziomu. Ocena ryzyka to ogólny proces identyfikacji ryzyka, analizy, oceny i łagodzenia. Wykorzystanie ocen ryzyka może pozwolić właścicielom i projektantom elastycznie i jasno definiować konkretne łagodzenia, które osiągają wyższy poziom ryzyka niż w normatywnych zalecenia.

5. ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

5.1. ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

Część aspektów związanych z zagadnieniami dotyczącymi systemów technicznych w tym obszarze opisano w raporcie nr 3, pt. „Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – bezpieczeństwo w obszarze otrzymywania wodoru”.

Transport wodoru może odbywać się z wykorzystaniem zbiorników ciśnieniowych oraz bezciśnieniowych, w sposób intermodalny. Może również być przesyłany za pomocą istniejących sieci dystrybucji gazu ziemnego. Dystrybucja wodoru może odbywać się na skalę przemysłową lub indywidualną (stacje tankowania wodorem). Wymagania związane z bezpieczeństwem systemów technicznych w tym obszarze, to¹⁰:

- zapewnienie pełnej dokumentacji projektowej koniecznej do przedstawienia odpowiednim jednostkom notyfikującym,

- zapewnienie personelu o odpowiedniej wiedzy i doświadczeniu,
- zapewnienie dokumentacji związanej z otoczeniem systemu technicznego (lokalizacja, warunki geologiczne, bliskość innej infrastruktury etc.),
- zapewnienie właściwych procedur analizy ryzyka oraz związanych z tym procesów decyzyjnych,
- właściwe zdefiniowane zagadnień do analiz ryzyka,
- właściwe zdefiniowanie obszarów chronionych (życie i zdrowie, środowisko naturalne, majątek etc.).

W przypadku infrastruktury dotyczącej transportu i dystrybucji zagadnienia dotyczące systemów technicznych związanych z inżynierią bezpieczeństwa, to przede wszystkim stosowanie odpowiednich norm i wytycznych oraz dobrej praktyki inżynierskiej zapewniających przynajmniej¹¹:

- odpowiednie zabezpieczenia przed niekontrolowanym uwolnieniem wodoru,
- zapewnienie odpowiednich urządzeń i procedur do kontroli wycieku wodoru,
- odpowiednie zabezpieczenia instalacji wodorowej przed kolizją (np. przewody przesyłające wodór powinny być podczas transportu opróżnione z wodoru),
- odpowiednią izolację, zabezpieczającą przed szybkim parowaniem wodoru podczas transportu,
- zapewnienie właściwych procedur operacyjnych,
- zapewnienie właściwych procedur naprawczych,
- zapewnienie właściwej wentylacji, jeżeli jest to konieczne,
- zapewnienie monitoringu rurociągów wodoru sprężonego i skroplonego.

Alternatywą związaną z bezpieczeństwem transportu może być w tym przypadku transport wodoru przy pomocy wodoru magnezu, w postaci pasty. Zawiera on bowiem wagowo aż 7,7 % wodoru. Prace nad tym rozwiązaniem prowadzi Instytut Fraunhofera. Podaje on informacje, że pasta zaczyna się rozkładać w temp. 250°C, co może być uznane za niedogodność, jednak zaletą tego rozwiązania jest wysoka gęstość energii pasty, podaje się, że może być ona nawet dziesięciokrotnie wyższa niż gęstość energii baterii¹².

5.2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z INFRASTRUKTURĄ I OTOCZENIEM

Transport wodoru, w celu dostarczenia go na stację tankowania, odbywa się w postaci gazowej, dlatego że istniejące na terenie Europy stacje tankowania wodorem operują gazowym wodorem. Prowadzone są prace badawczo-rozwojowe w obszarze operowania ciekłym wodorem przez stacje tankownia. Dlatego wspomniano w niniejszej pracy również o aspektach bezpieczeństwa wynikających z temperatur kriogenicznych.

Dla transportu wodoru sieciami do dystrybucji gazu ziemnego ważnym aspektem jest oddziaływanie wodoru na armaturę i urządzenia (sprężarki, filtroseparatory, itd.). Oddziaływanie to jest związane z bezpieczeństwem wodorowym, gdyż wodór może łatwiej migrować niż gaz ziemny. Aparaty i urządzenia te mogą ulec zniszczeniu, co może doprowadzić do wybuchu lub pożaru, a w efekcie, znacznych strat materialnych oraz zachwiania stabilności dostaw gazu ziemnego i wodoru.

Przykładami zdarzeń kryzysowych związanych z transportem i dystrybucją wodoru wspomniana już eksplozja, która miała miejsce w 2007 roku. Rutynowa dostawa gazowego wodoru zakończyła się wybuchem (wypadek śmiertelny) w elektrowni w Muskingum w stanie Ohio^e oraz eksplozja na stacji tankowania wodorem w 2019 roku w Norwegii.

^e <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>.

Po zdarzeniu firma obsługująca stację zawiesiła działalność także w innych lokalizacjach, a niektóre marki produkujące auta tankujące wodór, czasowo wstrzymały sprzedaż tych aut^f.

Wnioski pokontrolne związane z katastrofą w elektrowni Muskingum wskazywały braki i uchybienia w obszarze projektowym oraz eksploatacyjnym w kwestii doboru i instalacji armatury po stronie ciężarówki. Wskazywały również na brak odpowiednich procedur. Przypadek ten potwierdza, jak ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa jest etap projektowy oraz zachowanie odpowiednich wytycznych eksploatacyjnych.

W przypadku zastosowania ciekłego wodoru występują takie same zagrożenia związane z cieczami kriogenicznymi (niska temperatura), jak w przypadku magazynowania wodoru. Kwestię tę opisano w raporcie nr 4 „Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – bezpieczeństwo w obszarze magazynowania wodoru”.

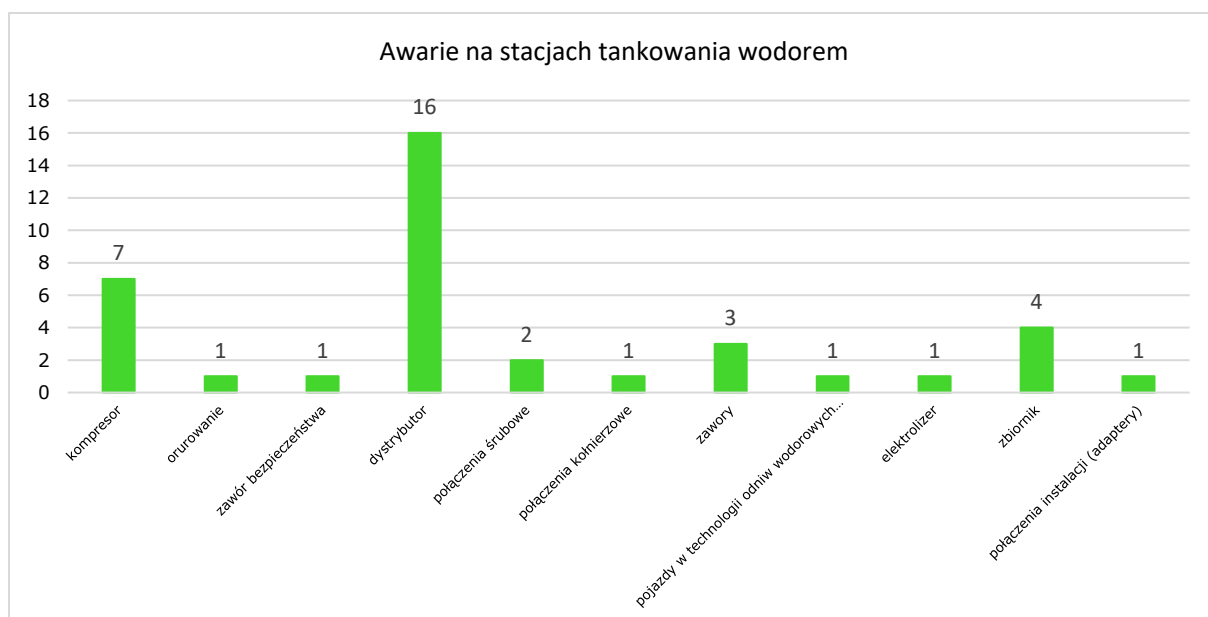
6. TECHNIKI INŻYNIERSKIE, SCENARIUSZE KRYZYSOWE

Wyznaczanie scenariuszy kryzysowych do analiz ryzyka związanych z transportem oraz dystrybucją wodoru polega przede wszystkim na sprecyzowaniu najbardziej prawdopodobnych zdarzeń oraz poddaniu ich analizie jakościowej oraz ilościowej w zakresie inżynierii bezpieczeństwa. Dla stacji tankowania wodorem są to dwa główne zdarzenia kryzysowe¹³:

- wyciek wodoru,
 - sprężarki,
 - zbiornika,
 - orurowania zewnętrznego,
 - przestrzeń buforowa,
- uszkodzenia dużych rozmiarów:
 - zbiornika mobilnego oraz stacjonarnego,
 - sprężarki,
 - dystrybutora,
 - węża do przesyłu wodoru,
 - połączeń rurarskich.

W związku z wystąpieniem powyższych zdarzeń możliwe jest wystąpienie niekorzystnych zjawisk termicznych (pożary, wybuchy, rozchodzenie się chmury wodoru etc.). Rysunek 1 przedstawia liczbę zdarzeń kryzysowych w USA oraz Japonii.

^f <https://electrek.co/2019/06/11/hydrogen-station-explodes-toyota-halts-sales-fuel-cell-cars/> zarchiwizowano: <http://archive.today/tjE7d>.



Rysunek 1 Liczba zdarzeń kryzysowych dla stacji tankowania wodorem w Japonii (2005 r.-2014r) oraz USA (2004 r.-2012 r.), opracowanie na podstawie13.

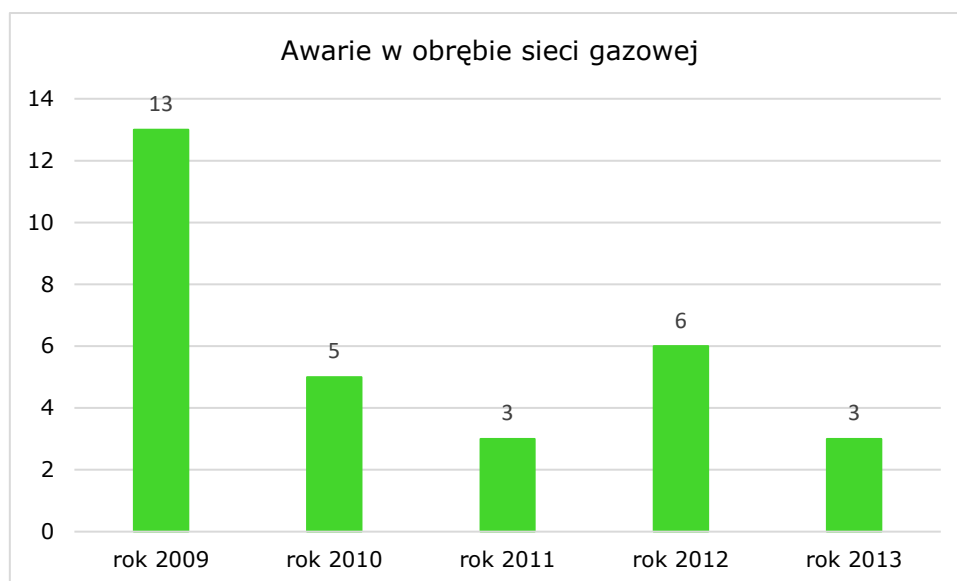
Również dla technologii transportu wodoru sieciami dystrybucji gazu naturalnego budowanie strategii bezpieczeństwa powinno polegać, na analizie właściwych scenariuszy kryzysowych, mogą to być np.:

- uszkodzenie mechaniczne rury gazowej (wypadek, trzęsienie ziemi etc.),
- analiza martwych stref w instalacji wodorowej, w celu uniknięcia gromadzenia się wodoru i co za tym idzie zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia korozji wodorowej,
- awarii aparatów i urządzeń mających za zadanie zabezpieczenie sieci gazowej przed niekontrolowanym wyciekiem.

Jako że brak jeszcze w literaturze informacji na temat przyczyn uszkodzeń rur gazowych transportujących wodór, należy wziąć pod uwagę przyczyny uszkodzeń tych sieci bez udziału wodoru w transporcie, są to głównie¹⁴:

- wpływ działań zewnętrznych (wypadek, działanie osób trzecich),
- korozja,
- wada konstrukcyjna, mechaniczna lub materiałowa,
- przyczyny środowiskowe, np. trzęsienie ziemi,
- prowadzenie prac na działającym rurociągu.

Rysunek 2 przedstawia ilość awarii w obrębie wewnętrznej instalacji gazowej w Polsce w latach 2009-2013.



Rysunek 2 Ilość awarii w obrębie wewnętrznej instalacji gazowej w Polsce w latach 2009-2013[szt.], opracowanie na podstawie¹⁵.

Dla każdego z tych niepożądanych procesów możliwe jest przeprowadzenie komputerowych analiz numerycznych z uwzględnieniem stworzenia cyfrowego bliźniaka takiej stacji. Pozwala to na przedstawienie w postaci symulacji teoretycznych konsekwencji zdarzenia kryzysowego, co może pozwolić na budowanie właściwej polityki bezpieczeństwa już na etapie projektowania systemu wodorowego.

7. PODSUMOWANIE

Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa w obszarze transportu i dystrybucji wodoru łączy w sobie aspekty związane zarówno z magazynowaniem, jak i przesyłem wodoru. Transport wodoru może się odbywać przy udziale środków transportu wyposażonych w zbiorniki oraz sieci dystrybucji gazu ziemnego. Istotnym elementem bezpieczeństwa w zakresie transportu wodoru przy użyciu zbiorników jest fakt, że w procesie tym środki transportu narażone są na wypadki komunikacyjne. W niektórych przypadkach również może występować ułatwiony dostęp osób trzecich do infrastruktury wodorowej.

Zapewnienie bezpieczeństwa w transporcie wodoru sieciami do dystrybucji gazu ziemnego wymaga szczególnej uwagi. Wynika to z niewystarczającego przystosowania istniejącej infrastruktury do odmiennych, w porównaniu z gazem ziemnym właściwości. Podstawowym czynnikiem wpływającym na odmienną właściwość wodoru od właściwości gazu ziemnego jest mniejsza masa molowa wodoru oraz jego znacznie niższa energia zapłonu. Zatlaczanie wodoru do sieci gazowej może wiązać się z krótszą żywotnością aparatów i urządzeń wchodzących w skład sieci.

Pośród prac koniecznych do zaplanowania transportu wodoru z użyciem istniejącej sieci gazowej należy przeprowadzić analizę szczelności oraz sprawdzenie zachowania się urządzeń i aparatów, które początkowo nie były dedykowane do pracy z medium zawierającym wodór. Możemy spotkać się z sytuacją, że straty w infrastrukturze mogą przewyższyć korzyści z faktu transportowania wodoru siecią do dystrybucji siecią gazową¹⁶.

8. BIBLIOGRAFIA

-
- ¹ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (poz. 1138), „Polska Strategia Wodorowa Do Roku 2030 Z Perspektywą Do Roku 2040”, Warszawa 2021 r., <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030>, data uzyskania dostępu: 28-03-2023, archiwum: <https://archive.ph/2Z0X3> zarchiwizowano 10-06-2023 r., str. 22-23.
- ² Vereš J., Ochodek T., Koloničný J., Safety aspects of hydrogen fuelling stations, Chemical Engineering Transactions, VOL. 91, 2022, DOI: 10.3303/CET2291009, 51-52.
- ³ WHA International, Inc. <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/> dostęp:15-04-2023, archiwum: <http://archive.today/vFRW7>.
- ⁴ Molkov V., Fundamentals of hydrogen safety engineering I, ISBN 978-87-403-0226-4, 2012, str. 66.
- ⁵ Hydrogen Tools, <https://h2tools.org/bestpractices/gaseous-gh2-and-liquid-hydrogen-lh2-fueling-stations>, data uzyskania dostępu: 15-04-2023.
- ⁶ Groznik J., Boil-off gas handling from, liquefied hydrogen storage, Norwegian University of science and Technology, 2020, str.27.
- ⁷ Groznik J., Boil-off gas handling from, liquefied hydrogen storage, Norwegian University of science and Technology, 2020, str.9.
- ⁸ European Industrial Gases Association, EIGA, Hydrogen transportation pipelines IGC Doc 121/04/E Globally harmonised document. https://h2tools.org/sites/default/files/Doc121_04%20H2TransportationPipelines.pdf data dostępu 15-04-2023
- ⁹ Tadeusz Uhl, „Czy wodór jest przyszłością transportu miejskiego? Stacje tankowania wodoru - część 1”, „Nowa Energia” - 1/2020, https://www.cire.pl/pliki/2/2020/czy_wodor_jest_przyszloscia_transportu_miejskiego___t_uhl.pdf, data uzyskania dostępu:15-04-2023.
- ¹⁰ Molkov V., Fundamentals of hydrogen safety engineering I, ISBN 978-87-403-0226-4, 2012.
- ¹¹ Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Safety standard for hydrogen and hydrogen systems., NASA Office of Safety and Mission Assurance, NSS 1740.16,1997, str. 802-903.
- ¹² <https://elektrowoz.pl/transport/powerpaste-pasta-przechowujaca-wodor-od-instytutu-fraunhofera-na-razie-dla-nikogo-ale-w-przyszlosci-do-czolgow/>.
- ¹³ Quesnel S., Quentin Nouvelot and Bachir Idrissi Ouadghiri, ENGIE, Benchmarking of Risk Assessment Methodology Applied to Refuelling Stations, 2021, str. 41.
- ¹⁴ Gooijer L., Lahei G. M.: On-site natural gas piping Scenarios and failure frequencies, Report 620550004/2011 A.A.C. van Vliet |, str.40.
- ¹⁵ Tazbir S., Gil A., Bezpieczeństwo użytkowania gazu ziemnego, Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa, <http://dx.doi.org/10.16926/tiib.2015.03.22>, str. 273.

¹⁶ Witek M., "Impact of hydrogen blended natural gas on linepack energy for existing high pressure pipelines" DOI: 10.24425/ather.2022.143174, Czasopisma Pan, str. 123.