



Politechnika Śląska w Gliwicach  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

# ZAGROŻENIA ZWIĄZANE Z TRANSPORTEM I MAGAZYNOWANIEM PALIW ZAWIERAJĄCYCH WODÓR

Seminarium Naukowe Podobszaru POB6.9

**Magazynowanie energii i energetyka wodorowa**

Prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin

Dr inż. Katarzyna Stolecka

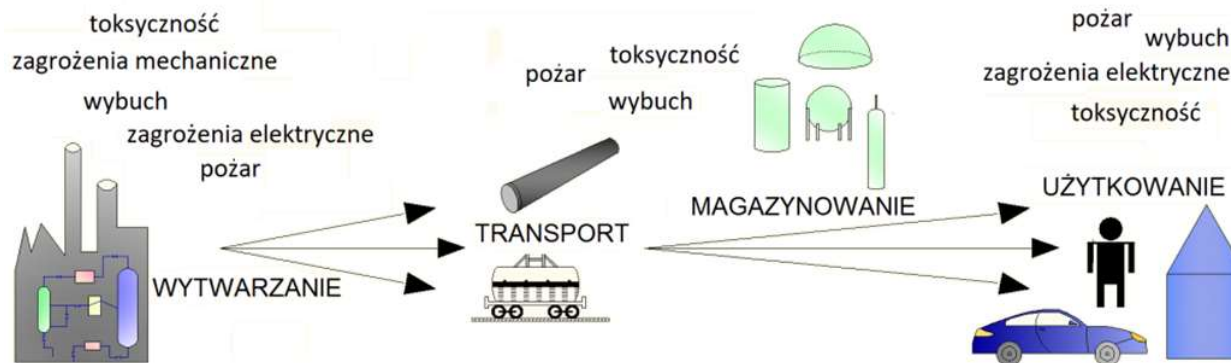
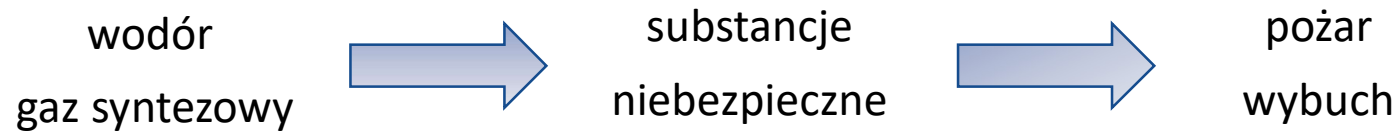
GLIWICE, 16.12.2020



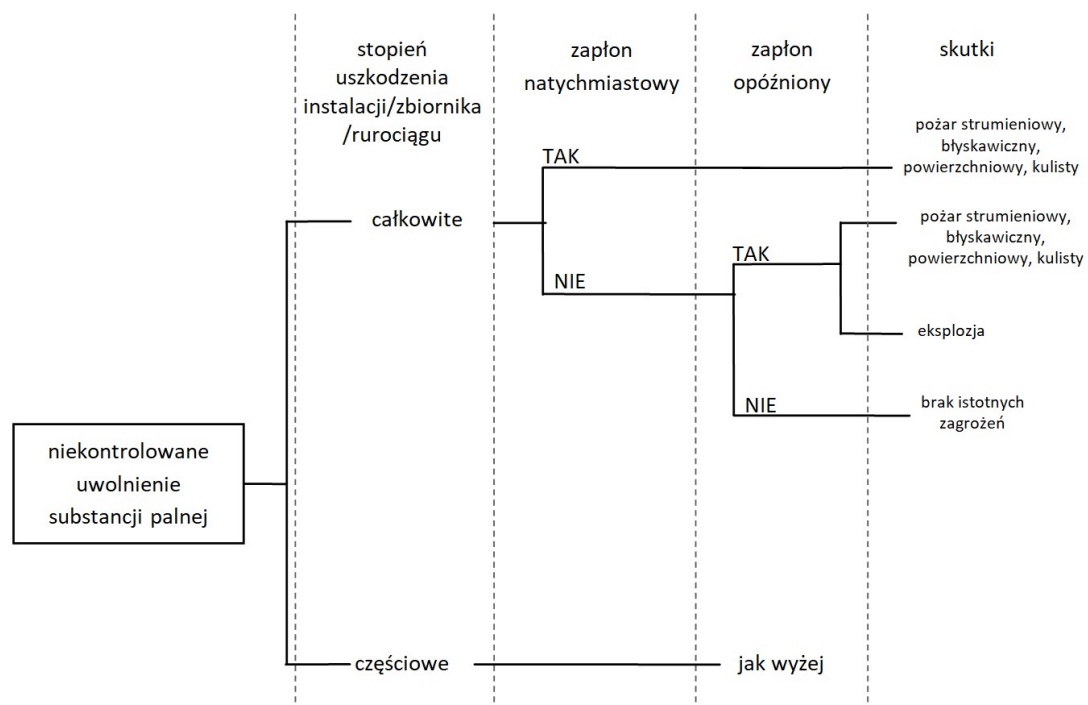
Politechnika  
Śląska

[www.kmiue.polsl.pl](http://www.kmiue.polsl.pl)

# Wprowadzenie



## Scenariusz zdarzenia niebezpiecznego



## Pożar instalacji – rodzaje



## Pożar paliwa - skutki

| Strumień cieplny            | Skutki dla człowieka i budynków                                                                                        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.5 kW/m <sup>2</sup>       | brak szkód i dyskomfortu dla długich czasów ekspozycji                                                                 |
| 2.5 kW/m <sup>2</sup>       | wartość tolerowana dla czasu ekspozycji do 5 min;<br>silny ból powyżej tego czasu ekspozycji                           |
| 5 kW/m <sup>2</sup>         | ból przy 20-sekundowej ekspozycji;<br>pęknięcie szkła przy 30 min. ekspozycji                                          |
| 9.5 kW/m <sup>2</sup>       | poparzenia II stopnia po 20 sekundach ekspozycji                                                                       |
| 12.5 – 15 kW/m <sup>2</sup> | poparzenia I stopnia po 10 s;<br>1% śmiertelności w ciągu 1 min;<br>topnienie tworzyw sztucznych (>30 min. ekspozycji) |
| 18-20 kW/m <sup>2</sup>     | degradacja izolacji kabli (>30 minut ekspozycji)                                                                       |
| 25 kW/m <sup>2</sup>        | silne zranienia w czasie 10 s;<br>100 % śmiertelności w ciągu 1 min;<br>deformacja stali (>30 minut ekspozycji)        |
| 35 – 37.5 kW/m <sup>2</sup> | 1 % śmiertelności w 10 s;<br>zniszczenie budynków i urządzeń technologicznych (>30 min ekspozycji)                     |
| 100 kW/m <sup>2</sup>       | zniszczenie konstrukcji stalowych (>30 min ekspozycji)                                                                 |



## Wybuch paliwa - skutki

| Nadciśnienie [kPa] | Skutki dla człowieka i budynków                                                                                                      |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.14               | dokuczliwy hałas, szum                                                                                                               |
| 0.21               | pękanie dużych szyb okiennych wykonanych ze zwykłego szkła                                                                           |
| 0.30               | głośny huk                                                                                                                           |
| 0.70               | zniszczenie ram okiennych                                                                                                            |
| 1.37               | zranienia od pękniętych szyb                                                                                                         |
| 2.7                | wartość bezpieczna dla budynku                                                                                                       |
| 2.8                | ograniczone uszkodzenia konstrukcji                                                                                                  |
| 4.8                | uszkodzenia konstrukcji budynku                                                                                                      |
| 6.9                | częściowe zburzenie budynków bez możliwości ich odbudowania                                                                          |
| 6.9 – 13.8         | zniszczenie płyt gipsowo-kartonowych, elementów stalowych i aluminiowych, uszkodzenie mocowań i posadowień elementów konstrukcyjnych |
| 9                  | lekkie odkształcenia ramowej konstrukcji budynków wykonanych ze stali                                                                |
| 13.8               | częściowe zawalenie się ścian i dachów budynków<br>uszkodzenie błony bębenkowej ucha człowieka                                       |
| 15.8               | dolna granica nadciśnień poważnych uszkodzeń konstrukcji                                                                             |
| 17.2               | zburzenie 50% domów murowanych                                                                                                       |

| Nadciśnienie [kPa] | Skutki dla człowieka i budynków                                                                                                                    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20.7               | niewielkie uszkodzenia ciężkich maszyn i urządzeń (o masie do 1,5 t), zniekształcenie i wyrwanie z posadowienia (fundamentu) konstrukcji stalowych |
| 34.4               | uszkodzenie płuc                                                                                                                                   |
| 34.5 – 48.0        | prawie całkowite zniszczenie budynków                                                                                                              |
| 41.3               | 50% uszkodzonych bębenków usznych                                                                                                                  |
| 48                 | wywrócenie załadowanych wagonów towarowych                                                                                                         |
| 48 – 55.1          | zniszczenie ścian murowanych o grubości mniejszej lub równej 0,3 m wykonanych z cegły pełnej                                                       |
| 62.1               | całkowite zniszczenie załadowanych, krytych wagonów towarowych                                                                                     |
| 68.9               | całkowite zniszczenie budynków, przesunięcie i poważne uszkodzenie ciężkich maszyn i urządzeń (o masie do 3,5 t)                                   |
| 99.9               | 1% zgonów wskutek uszkodzenia płuc                                                                                                                 |
| 137.8              | 50% zgonów wskutek uszkodzenia płuc                                                                                                                |
| 199.8              | 99% zgonów wskutek uszkodzenia płuc                                                                                                                |



## WODÓR - charakterystyka

- przyszłościowy nośnik energii
- jest bezbarwny i bezwonny
- jest gazem palnym.
- zakres palności mieści się w przedziale 4 - 75%
- minimalna energia zapłonu wodoru wynosi 0.02 mJ (metan 0.28 mJ)



Procesy magazynowania i transportu wodoru nierozzerwalnie wiążą się ze sposobem i kosztem jego wytwarzania.

Znaczącymi problemami w przesyle i przechowywaniu tego gazu są kwestie utrzymania czystości wodoru, zapobiegania jego wyciekom, minimalizacja kosztów oraz zapewnienie bezpieczeństwa. Najmniej kosztowną sytuacją byłaby możliwość wykorzystania wodoru w miejscu jego wytworzenia. Taka sytuacja ma miejsce np. w przemyśle chemicznym. Jednak nie zawsze jest to możliwe np. w przypadku motoryzacji, gdzie wodór w zbiorniku wykorzystany jest do napędu pojazdów.



## WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

### Zagrożenia:

- fizjologiczne wynikające z oddziaływania wodoru na ludzi
- fizyczne wynikające z kruchości wodorowej. Są one związane z właściwościami metali
- związane z użytkowaniem wodoru wynikające z właściwości tego gazu



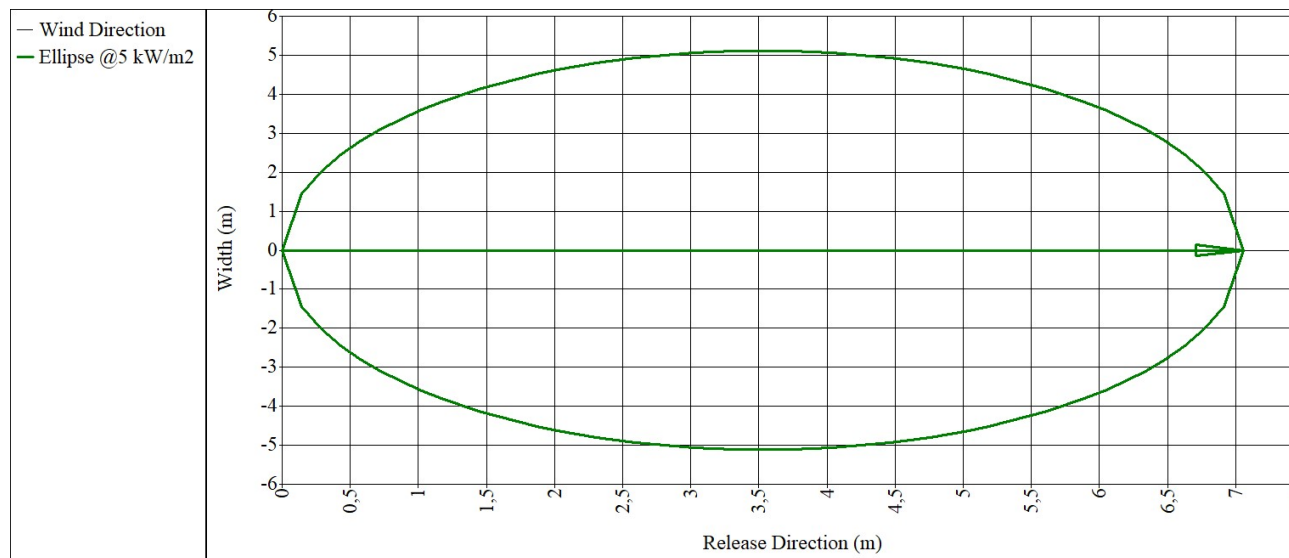
Swain M. , Fuel Leak Simulation.,  
Proceedings of the 2001  
DOE Hydrogen Program Review





## WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

- pożar strumieniowy

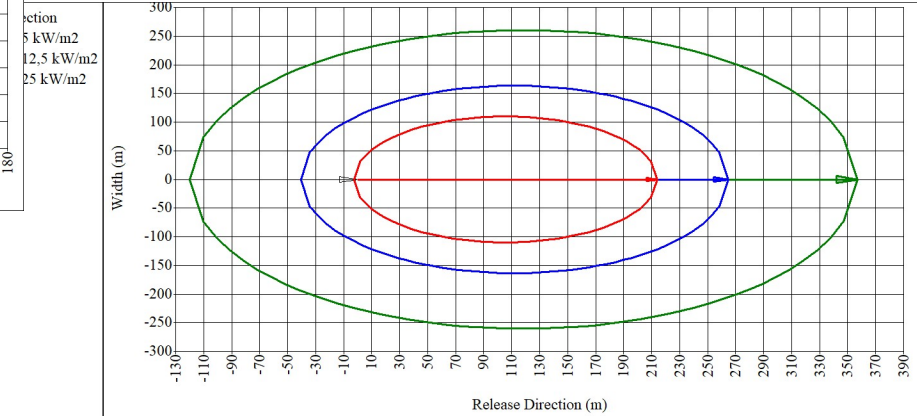
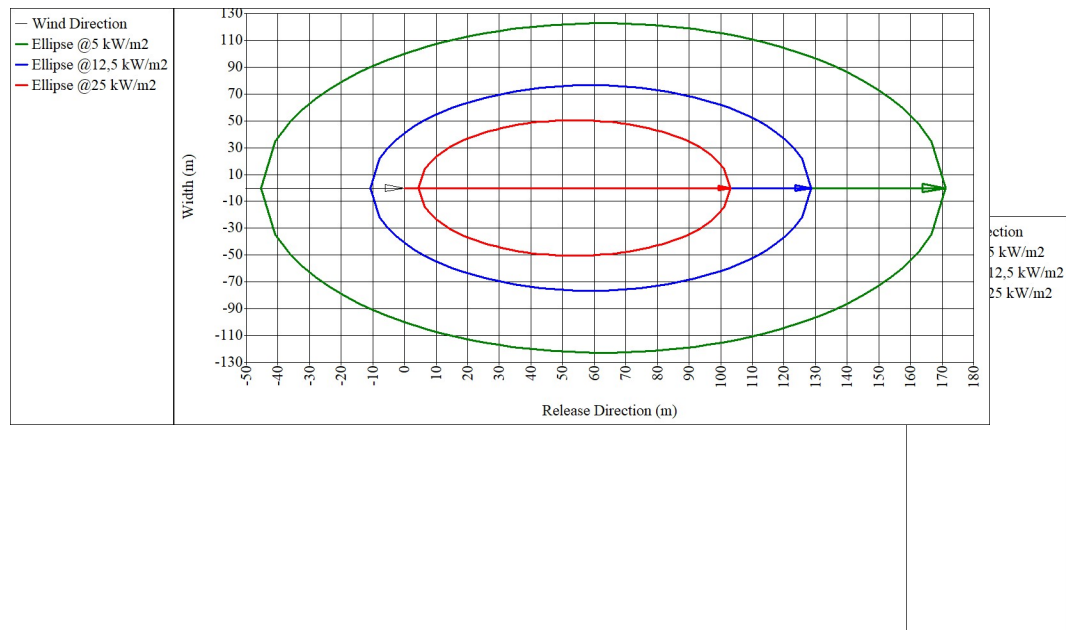


Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego wodoru (przewód L = 30 m, d = 100 mm)



# WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

## ■ pożar strumieniowy



Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego wodoru (rurociąg,  $p = 10$  MPa,  $d = 200/400$  mm)



Politechnika  
Śląska



Katedra Maszyn  
i Urządzeń Energetycznych

10

[www.kmiue.polsl.pl](http://www.kmiue.polsl.pl)

## WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

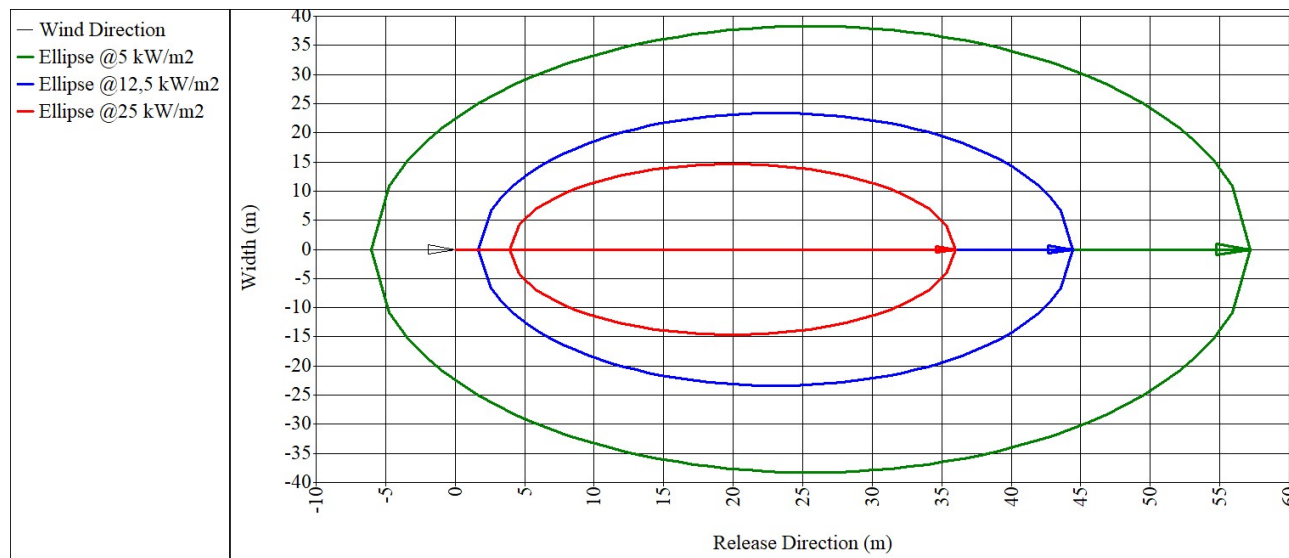
- pożar strumieniowy

| $u_w = 2 \text{ m/s}$ |            |            |            |
|-----------------------|------------|------------|------------|
|                       | d = 200 mm | d = 300 mm | d = 400 mm |
| x, m                  | 102        | 157        | 212        |
| A, m <sup>2</sup>     | 7 668      | 19 227     | 36 569     |
| $u_w = 4 \text{ m/s}$ |            |            |            |
|                       | d = 200 mm | d = 300 mm | d = 400 mm |
| x, m                  | 111        | 170        | 228        |
| A, m <sup>2</sup>     | 8 916      | 21 996     | 41 227     |
| $u_w = 6 \text{ m/s}$ |            |            |            |
|                       | d = 200 mm | d = 300 mm | d = 400 mm |
| x, m                  | 118        | 178        | 239        |
| A, m <sup>2</sup>     | 9 595      | 23 547     | 44 016     |



## WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

- pożar strumieniowy

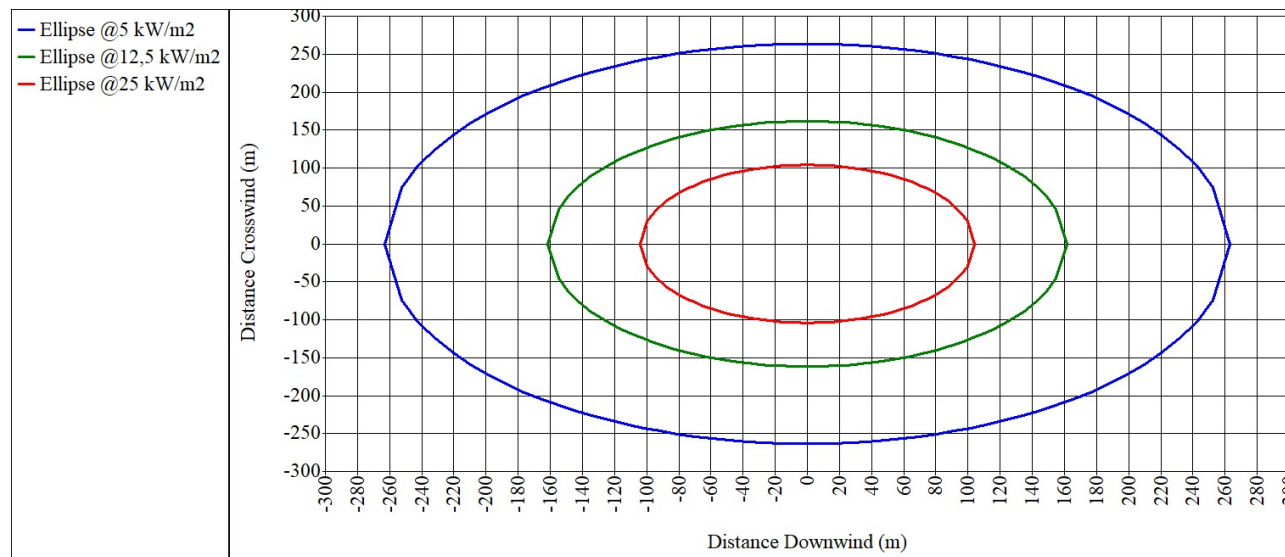


Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego wodoru (zbiornik)



# WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

## ■ BLEVE/kula ognista

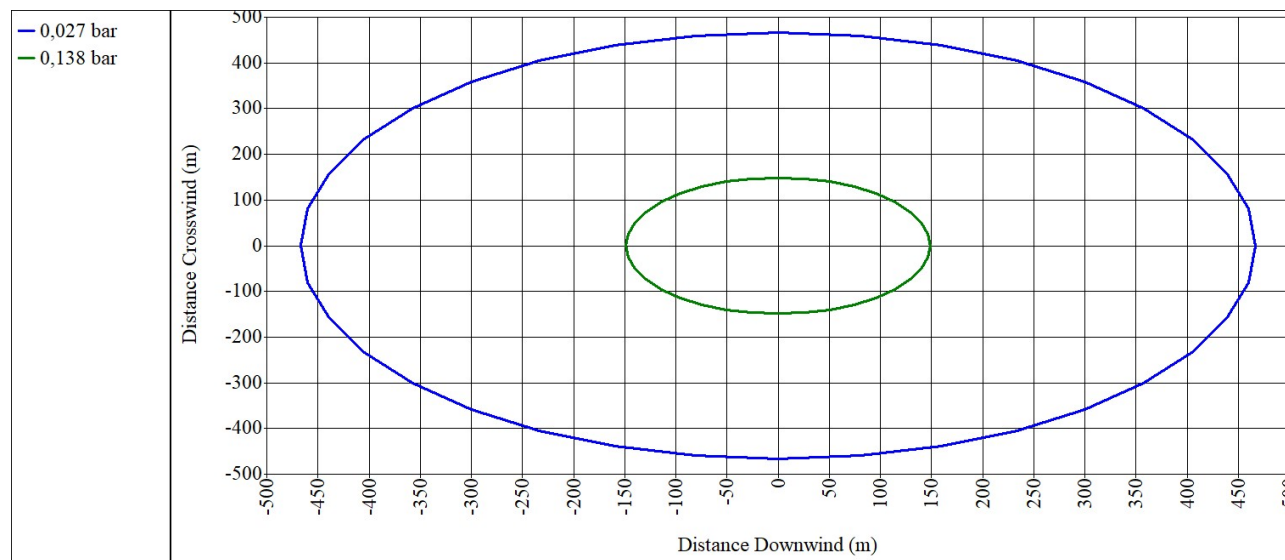


Strefy zagrożenia dla pożaru w kształcie kuli ognistej/BLEVE wodoru (zbiornik)



# WODÓR – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

## ■ wybuch

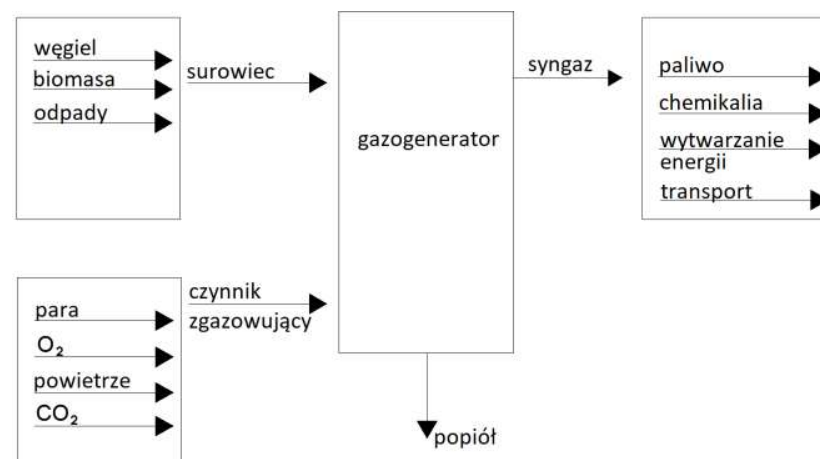


Strefy zagrożenia dla wybuchu wodoru (zbiornik)



## Gaz syntezowy – charakterystyka i otrzymywanie

- stanowi jeden z przykładów paliw otrzymywanych w procesach konwersji i gazyfikacji paliw
- stanowi mieszaninę przede wszystkim **tlenku węgla i wodoru**
- obecnie na całym świecie istnieje ponad 272 instalacji gazyfikacji z 686 generatorami. Trwa również budowa kolejnych 74
- najczęściej wykorzystywanym substratem w procesie zgazowania obecnie oraz w przewidywanej przyszłości jest **węgiel**



## Gaz syntezowy – transport i magazynowanie

Obecnie magazynowanie i transport gazu syntezowego nie jest zjawiskiem powszechnym. Wynika to z faktu, że gaz syntezowy najczęściej kierowany jest bezpośrednio do zużycia.

Syngaz może być magazynowany w zbiornikach naziemnych o wysokim i niskim ciśnieniu, istniejących rurociągach oraz w podziemnych zagłębieniach. Najistotniejszym stacjonarnym systemem magazynowania gazu syntezowego na dużą skalę jest magazynowanie gazu w postaci sprężonej. Jest to prosty sposób przechowywania syngazu wymagający zastosowania zbiornika ciśnieniowego i sprężarki. Wiąże się więc z niższymi kosztami niż np. skraplanie.





## Syngaz – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

Bezpieczeństwo użytkowania instalacji gazu syntezowego określa jego składu tj. **stosunek udziału wodoru i tlenku węgla**. W określeniu zagrożeń związanych z procesami wytwarzania, transportu i magazynowania syngazu właściwości fizykochemiczne tych dwóch podstawowych składników mają istotny wpływ.

Na przebieg awarii zapoczątkowanej niekontrolowanym uwolnieniem gazu syntezowego będą więc miały wpływ jego właściwości fizykochemiczne takie, jak m.in. granica palności, minimalna energia zapłonu, temperatura samozapłonu czy też stężenie toksyczne.



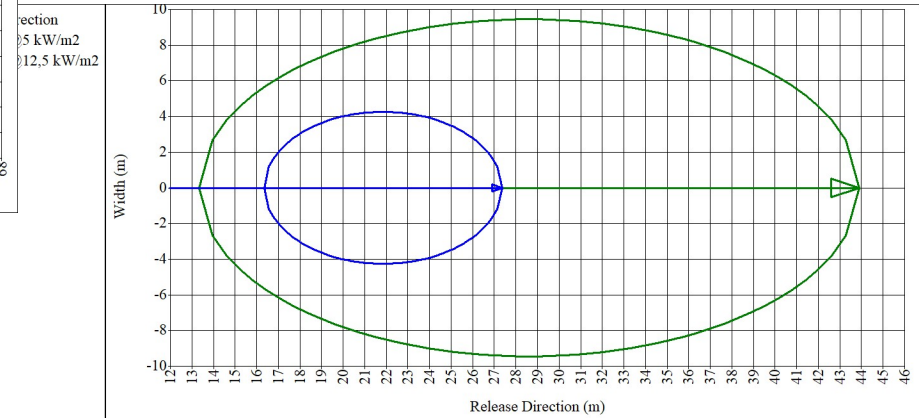
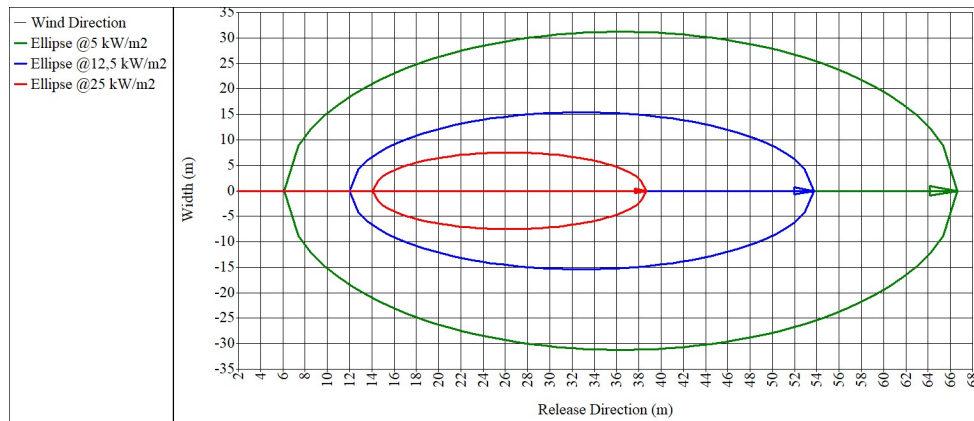
## Syngaz – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

|                       | Substrat |        |         |         |
|-----------------------|----------|--------|---------|---------|
| składnik gazu syntezy | węgiel   | węgiel | biomasa | biomasa |
| CO                    | 22       | 29     | 10      | 12      |
| CO <sub>2</sub>       | 30       | 30     | 16      | 16.1    |
| H <sub>2</sub>        | 38       | 36     | 14      | 16      |
| CH <sub>4</sub>       | 9.5      | 4.5    | -       | 4.5     |
| N <sub>2</sub>        | 0.5      | 0.5    | 60      | 51.4    |
| L <sub>d</sub>        | 7.45     | 8.10   | 23.26   | 16.71   |



# Syngaz – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

## ■ pożar strumieniowy

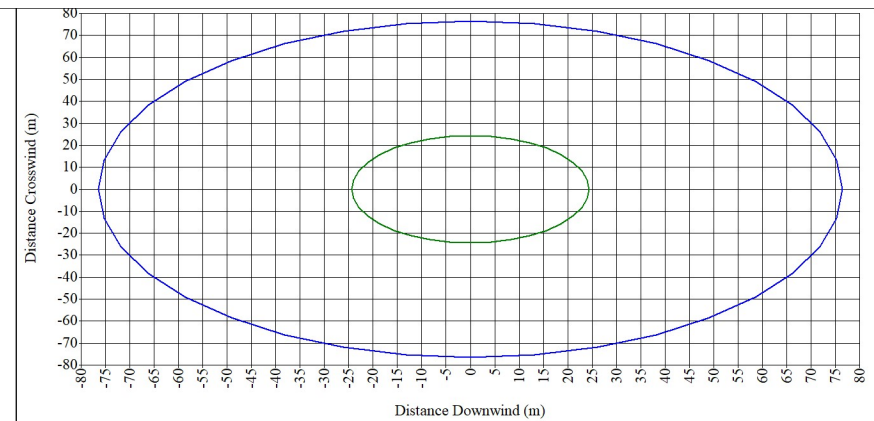
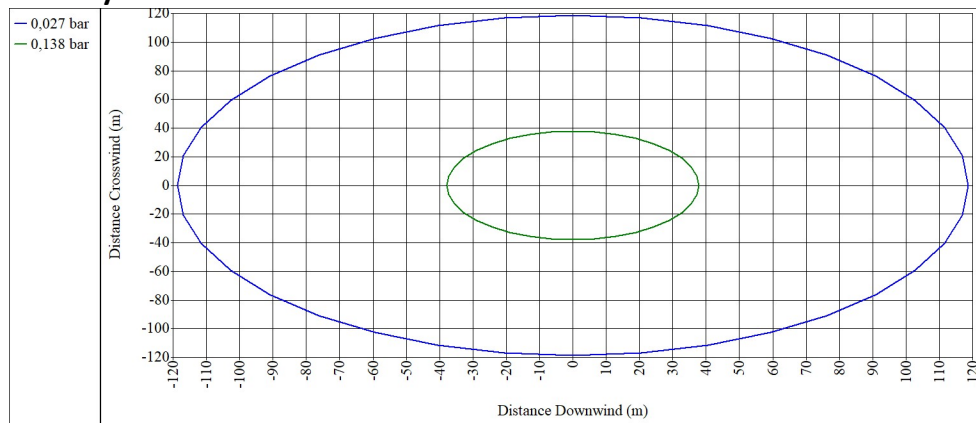


Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego gazu syntezowego otrzymanego w wyniku zgazowania węgla/biomasy (rurociąg)



## Gaz syntezowy – analiza zagrożeń związanych z użytkowaniem syngazu

### ■ wybuch

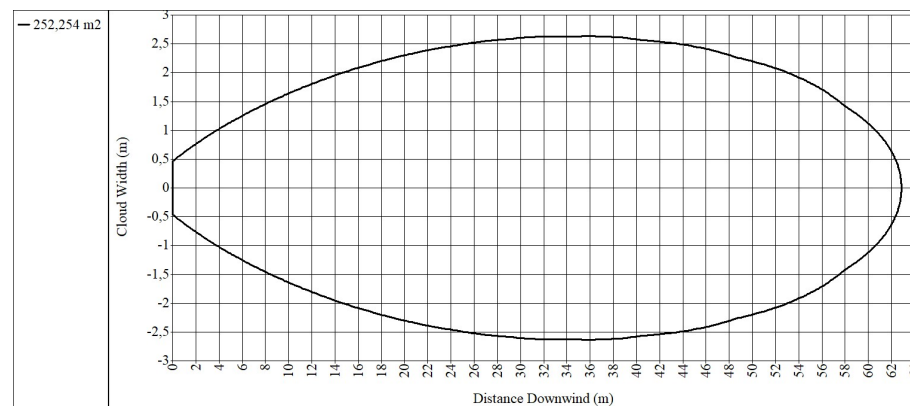
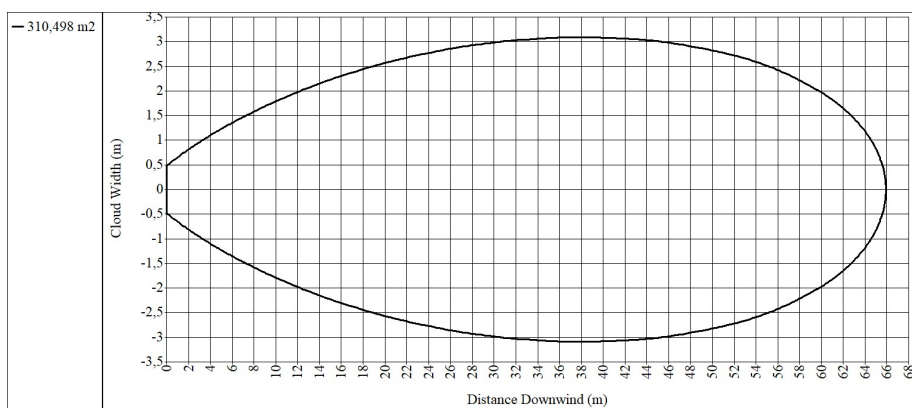


Strefa zagrożenia dla wybuchu gazu syntezowego otrzymanego w wyniku zgazowania węgla/biomasy (zbiornik)



## Syngaz – analiza zagrożeń związanych z magazynowaniem i transportem

### ■ zagrożenie toksyczne

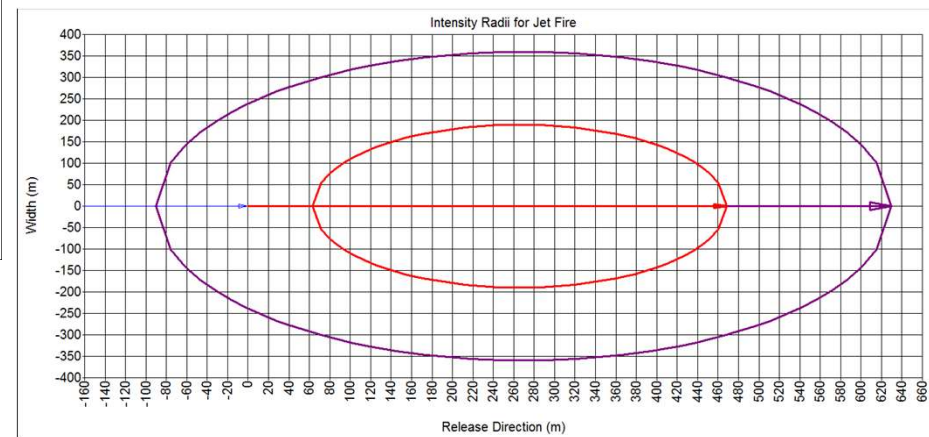
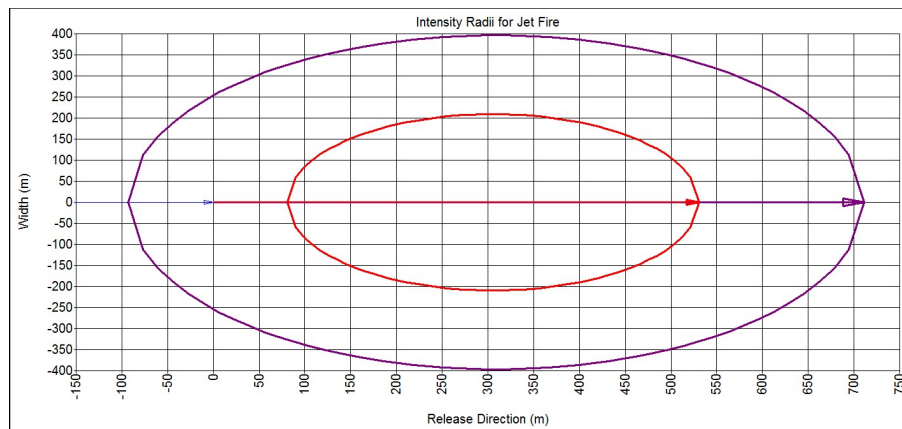


Chmura toksycznego stężenia gazu syntezowego otrzymanego w wyniku zgazowania  
węgla oraz biomasy (zbiornik)



## Transport i magazynowanie mieszaniny wodór-metan

Dopuszczalne stężenie wodoru w sieci 5-15% (np. w Holandii - 2%, w Niemczech - 5%)



Strefy niebezpieczne dla pożaru strumieniowego metanu oraz mieszaniny metan/wodór



## Wybrane publikacje

- Stolecka K., Rusin A., *Potential hazards posed by biogas plants*, Renewable & Sustainable Energy Review, 135, 2021, p. 110-125
- Stolecka K., Rusin A., *Analysis of hazards related to syngas production and transport*, Renewable Energy, 146, 2020, p. 2535-2555
- Stolecka K., Rusin A., *Hazards associated with syngas storage*, RDPE 2019, E3S Web of Conferences 137, 2019
- Witkowski A., Rusin A., Majkut M., Stolecka K., *Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 166, 2018, p. 24-34
- Stolecka K., *Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network*, Journal of Power Technologies, 98(4), 2018, p. 329-335
- Witkowski A., Rusin A., Majkut M., Stolecka K., *Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects*, Energy, 14, 2017, p. 2508-2518
- Rusin A., Stolecka K., *Hazards associated with hydrogen infrastructure*, Journal of Power Technologies, 97(2), 2017, p. 153-157
- Rusin A., Stolecka K., *Reducing the risk level for pipelines transporting carbon dioxide and hydrogen by means of optimal safety valves spacing*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 33, 2015, p. 77-87



---

# Dziękuję za uwagę

[andrzej.rusin@polsl.pl](mailto:andrzej.rusin@polsl.pl)  
[katarzyna.stolecka@polsl.pl](mailto:katarzyna.stolecka@polsl.pl)



Politechnika  
Śląska



Katedra Maszyn  
i Urządzeń Energetycznych

[www.kmie.polsl.pl](http://www.kmie.polsl.pl)

24