

# Technologie *Power-to-gas*

Maciej Chaczykowski, Andrzej J. Osiadacz

## Analiza wrażliwości elementów systemu gazowniczego na podwyższone stężenie wodoru w sieci

Zatłaczanie wodoru produkowanego w instalacjach Power-to-gas do sieci gazowej jest interesującym rozwiązaniem, ponieważ umożliwia integrację systemów elektroenergetycznego i gazowniczego w celu magazynowania nadwyżek energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Kilka projektów demonstracyjnych, mających na celu wykazanie możliwości zatłaczania wodoru do sieci gazowej, jest obecnie w fazie projektowania lub eksploatacji w Europie i na świecie, w tym instalacja w Falkenhagen we wschodnich Niemczech [Schneider, 2013]. Otwarta w 2013 roku instalacja o mocy 2 MW wytwarza nominalnie 360 m<sup>3</sup>/h wodoru zatłaczanego do regionalnej sieci przesyłowej i jest największą tego typu instalacją na świecie. Podczas gdy zatłaczanie biometanu do sieci gazowej nie niesie ze sobą żadnego ryzyka, zatłaczanie wodoru może okazać się problematyczne, gdyż rodzi wiele pytań związanych z wrażliwością poszczególnych elementów systemu na podwyższone stężenia wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym. Celem artykułu jest przybliżenie wyników prac badawczych prowadzonych w tym zakresie na świecie oraz prezentacja wyników badań mających na celu ocenę możliwości zatłaczania wodoru do lokalnej sieci dystrybucyjnej w polskich warunkach.

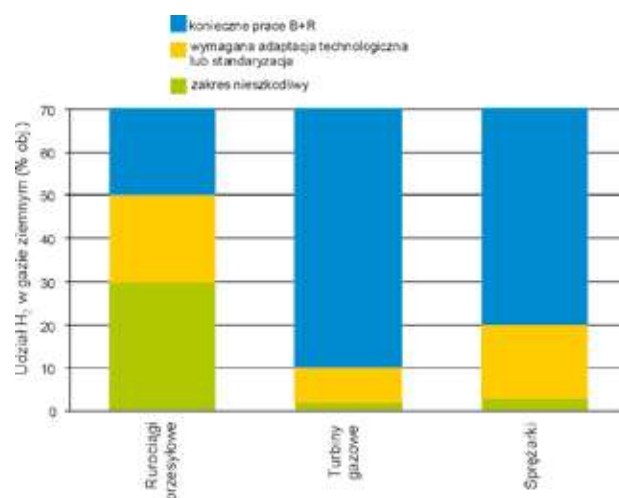
## Dopuszczalne stężenia wodoru w elementach systemu gazowniczego

Powszechnie stosowanymi nośnikami energii w gazownictwie są mieszaniny węglowodorów, których głównym składnikiem jest metan. W ostatnich latach czynione są próby wykorzystania jako nośnika energii również wodoru. Z powodu małych rozmiarów cząsteczki, małej masy i małej lepkości wodoru wykazuje skłonność do wycieków w większym stopniu niż mieszaniny węglowodorów. Potrafi również dyfundować przez ściany zbiorników, w których jest magazynowany. Z tego powodu w normie DIN 51624:2008 *Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Erdgas – Anforderungen und Prüfverfahren* ograniczono dopuszczalny udział wodoru w mieszaninach ze sprężonym gazem ziemnym (CNG) stosowanym do zasilania pojazdów samochodowych do 2% obj. Ponadto zakłada się, że zbiorniki na sprężony gaz ziemny CNG zawierający wodoru powinny być wykonane ze stali, a w przypadku zbiorników kompozytowych powinny posiadać warstwę barierową wykonaną z metalu, np. aluminium [Hüttenrauch i Müller-Syring, 2010].

Generalnie, dopuszczalna ilość wodoru w sieci gazowej powinna być określana indywidualnie, z uwzględnieniem struktury sieci, składu gazu ziemnego, strumienia gazu oraz wyposażenia odbiorców w urządzenia gazowe. Jednakże poszczególne kraje starają się uogólnić wytyczne w tym zakresie. Na przy-

kład dopuszczalne stężenie wodoru w gazie ziemnym w sieci przesyłowej w Holandii wynosi 2% obj. [Grond i in., 2013], natomiast analogiczna wartość podana w standardzie technicznym DVGW G 262 dla rynku niemieckiego wynosi 5%. Niemieckie stowarzyszenie naukowo-techniczne branży gazownictwa i wodociągowej (DVGW) zleciło partnerom w przemyśle i w ośrodkach naukowych przeprowadzenie badań w celu określenia maksymalnego dopuszczalnego stężenia wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym w poszczególnych elementach systemu gazowniczego. W raporcie końcowym określono pięć obszarów funkcjonalnych łańcucha dostaw gazu [Müller-Syring i in., 2012]: (I) transport, (II) magazynowanie, (III) pomiar i regulacja, (IV) dystrybucja gazu i (V) użytkowanie, które obejmowały 30 procesów technologicznych. Dla każdego procesu zostały zidentyfikowane dopuszczalne stężenia wodoru, podane za pomocą trzech progów, dla których: a) mieszanie wodoru jest nieszkodliwe, b) wymagana jest adaptacja technologiczna bądź regulacja administracyjna oraz c) prace badawczo-rozwojowe są nadal potrzebne. Dane dotyczące wrażliwości elementów systemu gazowniczego na zawartość H<sub>2</sub> w gazie ziemnym przedstawiono na rysunkach 1–5. Kolorem zielonym oznaczono na wykresach zakres stężeń wodoru niestwarzających problemów eksploatacyjnych, żółtym – zakres, w którym istnieje konieczność standaryzacji, natomiast niebieskim – zakres, w którym konieczne są prace badawcze.

Rys. 1. Wrażliwość elementów systemu przesyłowego gazu na zawartość H<sub>2</sub> w gazie ziemnym [Müller-Syring i in., 2012]



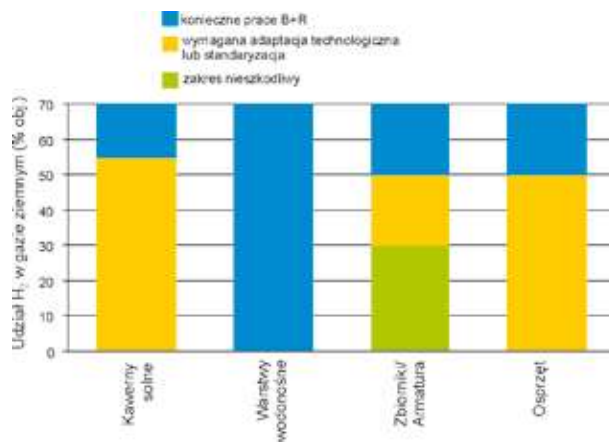
Na rys. 1. przedstawiono rezultaty prac w odniesieniu do procesów związanych z transportem gazu. Zawartości wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym uważane jako „niekrytyczne” zmieniały się od 50% dla materiału rurociągu, poprzez 20% w odniesieniu do pracy sprężarki, do 10% w odniesieniu do

pracy turbiny gazowej. Powodem ww. ograniczeń jest fakt, iż wodór ze względu na małą średnicę atomu łatwo dyfunduje w strukturach krystalicznych żelaza nawet w temperaturze pokojowej. Badania wykazały, że przenikanie i dyfuzja wodoru w dużej mierze uzależnione są od struktury metalu, temperatury, ciśnienia, stanu powierzchni, pierwiastków chemicznych znajdujących się w strukturze stali, a także stanu naprężenia. Wodór oddziałuje z defektami struktury, takimi jak dyslokacje, granice ziaren i faz oraz wtrącenia niemetaliczne. Oddziaływanie to, nazywane od mechanizmu działania pułapkowaniem, w znacznym stopniu modyfikuje transport wodoru i wpływa na przebieg niszczenia wodorowego metalu. Obecność wodoru w metalach i stopach wywiera niekorzystny wpływ na ich właściwości fizyczne, mechaniczne i elektrochemiczne, objawiający się m.in. zmniejszoną wytrzymałością mechaniczną i zwiększoną kruchością. Ponadto, wodór intensyfikuje przebieg procesów korozji stali i stopów. Pod wpływem oddziaływania wodoru w różny sposób przebiegają też procesy ich niszczenia. Wodór, który przeniknął do stali, w znacznym stopniu zmienia jej właściwości mechaniczno-użytkowe, a stopień tych zmian jest zależny m.in. od składu chemicznego stali, mikrostruktury, stopnia zanieczyszczenia, a także od rodzaju zastosowanej obróbki cieplnej i mechanicznej, którym została poddana. Nawodorowanie wywiera największy wpływ na jej właściwości wytrzymałościowe i plastyczne.

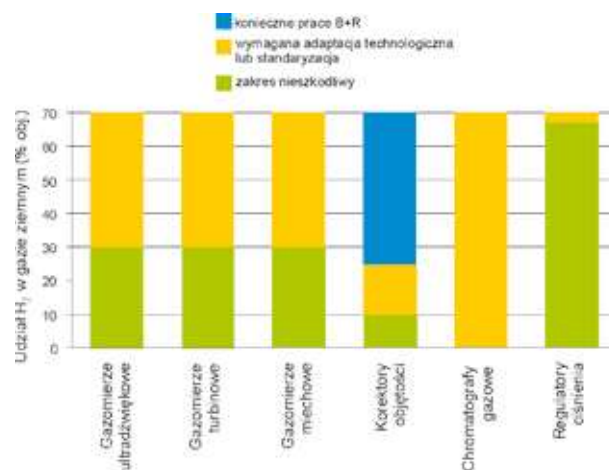
Turbiny gazowe, wyposażone w niskoemisyjne palniki z wstępnym wymieszaniem paliwa, mogą być wrażliwe na obecność wodoru w paliwie, dlatego obecnie dopuszczalny udział wodoru w paliwie ograniczono do 5% obj., a czasami nawet do 1% obj. Należy jednak podkreślić, że istnieje duży potencjał podniesienia ww. limitów, na przykład niektórzy producenci turbin (Solar, Siemens) deklarują dopuszczalny udział wodoru w paliwie na poziomie odpowiednio 4% obj. i 15% obj. Ograniczenia w przypadku sprężarek dotyczą przede wszystkim koniecznego wzrostu strumienia gazu (przepustowości), kompensującego spadki kaloryczności mieszaniny gaz ziemny–wodór, w związku z koniecznością dostarczenia jednakowego strumienia energii (mocy zamówionej) przez system przesyłowy.

Biorąc pod uwagę roczne zużycie gazu w Polsce na poziomie 180 TWh (około 16 mld m<sup>3</sup>), jedynym dostępnym rozwiązaniem, jeśli chodzi o długoterminowe magazynowanie gazu w odpowiedzi na sezonową nierównomierność zużycia, jest zastosowanie podziemnych magazynów gazu. Problem nierównomierności dotyczy również zużycia energii elektrycznej, a zwiększone zapotrzebowanie na tzw. szczytowe moce wytwórcze pojawia się w przypadku dużego udziału źródeł odnawialnych w bilansie wytwarzania energii. Na przykład w Niemczech prognozuje się, że przy 80-procentowym udziale odnawialnych źródeł energii w bilansie wytwarzania energii (rok 2050), zapotrzebowanie na długoterminową pojemność magazynową (odpowiednio 17 dni) będzie wynosiło 7,5 TWh [Adamek i in., 2012]. Technologie *Power-to-gas* w połączeniu z podziemnym magazynowaniem wodoru lub mieszanin gaz ziemny–wodór obecnie są jedynym rozważanym rozwiązaniem przy pojemnościach magazynowych tej skali i przyjętym horyzoncie czasowym. Wrażliwość elementów systemu magazynowania na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem

Rys. 2. Wrażliwość elementów systemu magazynowania na zawartość H<sub>2</sub> w gazie ziemnym [Müller–Syring i in., 2012]



Rys. 3. Wrażliwość urządzeń pomiarowych i regulacyjnych na zawartość H<sub>2</sub> w gazie ziemnym [Müller–Syring i in., 2012]



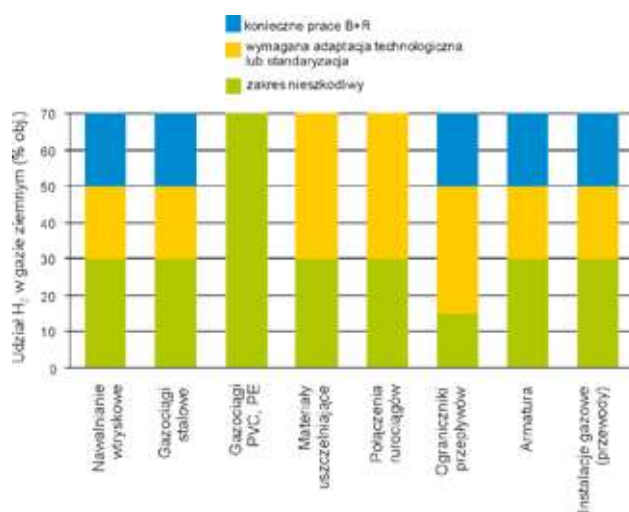
ziemnym przedstawiono na rys. 2. Doświadczenia zebrane przy magazynowaniu gazu miejskiego, zawierającego do 90% wodoru na początku lat 90. pokazują techniczną możliwość magazynowania wodoru. Największe problemy dotyczą magazynowania w strukturach zawodnionych, m.in. z uwagi na nieszczelności, ryzyko tworzenia się hydratów oraz sprzyjanie wilgotnego środowiska rozwojowi mikroorganizmów i procesowi korozji.

Wrażliwość aparatury kontrolno-pomiarowej na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym przedstawiono na rys. 3. Problemy dotyczą głównie przeliczników objętości oraz chromatografów gazowych. W przypadku układów korekcyjnych stosowane obecnie procedury wyznaczania współczynnika ściśliwości na podstawie wiralnego równania stanu (SGERG-88 oraz AGA8-DC92) posiadają ograniczenia, jeśli chodzi o udział wodoru w mieszaninie gazu ziemnego na poziomie 10%. Nowsze równanie stanu [GERG, 2004] nie narzuca tego typu ograniczenia i pozwala na wyznaczenie gęstości dwuskładnikowej mieszaniny metan–wodór z niepewnością  $\pm 0,07$ – $0,1\%$ , przy udziale molowym wodoru 15–75% i w szerokim zakresie wartości temperatury i ciśnienia. Największym problemem w obszarze urządzeń pomiarowych jest brak możliwości pomiaru obecności wodoru w mieszaninie z gazem

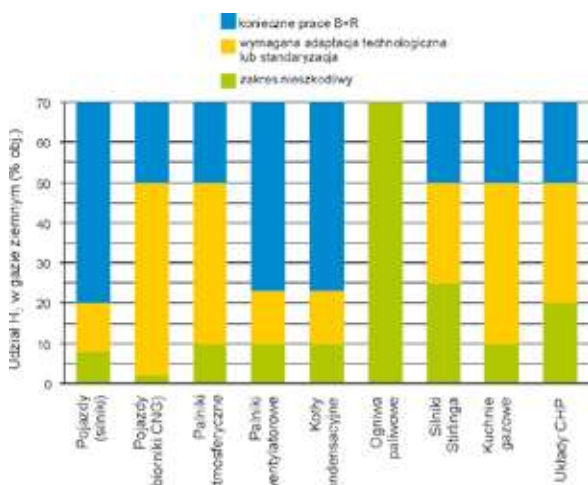
ziemnym przy wyznaczaniu składu gazu ziemnego na potrzeby pomiaru kaloryczności we wszystkich chromatografach procesowych zainstalowanych przed 2013 r. W urządzeniach tych niemiecka administracja miar (PtB) narzuca górny limit udziału wodoru w mieszaninie na poziomie 0,2% [Spohn i Klaas, 2015].

Na rys. 4. przedstawiono wyniki badań oceny wpływu podwyższonych stężeń wodoru w gazie ziemnym w systemach dystrybucyjnych. Rozwiązania techniczne stosowane w systemach dystrybucyjnych nie stwarzają przeszkód w zwiększeniu udziału wodoru w gazie ziemnym. Sygnalizowane 15-procentowe ograniczenie na udział wodoru w ogranicznikach przepływu wynika ze zmiany kaloryczności i strumienia gazu, powodujących wzrost prędkości przepływu strumienia w celu dostarczenia jednakowej ilości energii. Na przykład mieszanina metan–wodór o udziałach masowych 85%/15% w sieciach dystrybucyjnych niskiego i średniego ciśnienia (nadciśnienie odpowiednio 10 i 400 kPa) będzie miała 1,7 razy większą prędkość przepływu w porównaniu z czystym metanem, przy założeniu jednakowego strumienia energii dostarczanego gazu. Wyniki badań wrażliwości odbiorników gazu na podwyższone udziały wodoru przedstawiono na rys. 5. Doświadczenia eks-

Rys. 4. Wrażliwość elementów systemu dystrybucyjnego na zawartość  $H_2$  w gazie ziemnym [Müller–Syring i in., 2012]



Rys. 5. Wrażliwość odbiorników gazu na zawartość  $H_2$  w gazie ziemnym [Müller–Syring i in., 2012]



ploatacyjne floty autobusów CNG w Szwecji (Malmö) pokazują, że domieszka 8% obj. wodoru do gazu ziemnego nie stanowi obecnie problemu, z perspektywą zwiększenia jego udziału do 20%. Istotny problem stanowi ograniczenie 2% obj. dla stalowych zbiorników w pojazdach zasilanych CNG, zalecane w normie DIN 51624. Rozwiązaniem jest, oczywiście, zastosowanie zbiorników kompozytowych. Palniki kotłów i kuchni gazowych są przygotowane do spalania mieszaniny gazu ziemnego z wodorem, przy udziale wodoru do 10% obj. Wyższy udział wodoru wymaga regulacji urządzeń (np. wymiana dyszy w kuchni gazowej) w celu uzyskania jednakowej mocy palnika. W przypadku tłokowych silników spalinowych pracujących w układach kogeneracyjnych większe prędkości propagacji płomienia mieszaniny gazu ziemnego z wodorem mają pozytywny wpływ na sprawność silnika i jednocześnie negatywny na poziom emisji tlenków azotu, jednak przy udziale wodoru nieprzekraczającym 15% obj. ww. efekty nie są znaczące.

W związku z brakiem wytycznych odnośnie do projektowania i budowy instalacji *Power-to-gas* opracowano nowy standard DVGW G 265-3, dotyczący projektowania i budowy instalacji zatłaczania wodoru do sieci gazowej. Kwestie dostarczania wodoru do sieci poruszane są również w standardzie DVGW G 262, dotyczącym zatłaczania biometanu [Spohn i Klaas, 2015].

## Śledzenie zmian jakości gazu w sieci

Jednym z podstawowych problemów dotyczących procesu zatłaczania wodoru do sieci dystrybucyjnej jest spadek kaloryczności mieszaniny gazu ziemnego z wodorem (licząc objętościowo). W związku z koniecznością dostarczenia jednakowego strumienia energii chemicznej paliwa (mocy zamówionej) do odbiorców powoduje on zwiększenie strumienia gazu w sieci w celu kompensacji spadku kaloryczności. Wprowadzanie wodoru do sieci powinno być zatem poprzedzone analizą zapasu przepustowości sieci, z uwzględnieniem reguł mieszania gazu w węzłach sieci oraz dodatkowych spadków ciśnienia w odcinkach sieci, spowodowanych zwiększoną prędkością przepływu gazu. Ponadto, mieszanina gazu ziemnego z wodorem wykazuje inne właściwości termodynamiczne niż właściwości gazu ziemnego, w związku z czym zalecanym równaniem stanu do obliczeń gęstości gazu jest równanie GERG 2004.

Przy założeniu, że analizowana sieć składa się z  $N$  węzłów,  $M$  łuków oraz  $IU$  elementów nieliniowych (źródeł, regulatorów przepływu lub ciśnienia, zaworów odcinających), model matematyczny przepływu gazu w sieci, pozwalający na śledzenie zmian jakości gazu, tworzą następujące równania [Osładacz, 2000]:

- $N$  równań opisujących bilans strumieni w węzłach (I prawo Kirchhoffa)

$$\sum_{k \in C_i} a_{ik} Q_k = S_i \quad (1)$$

gdzie  $C_i$  jest zbiorem łuków incydentnych do węzła  $i$ ,  $a_{ik} = \pm 1$  w zależności od tego, czy łuk  $k$  ma początek (+1) lub koniec (-1) w węźle  $i$ ,  $S_i$  jest strumieniem gazu dostarczanego do źródła w węźle  $i$ .

- $M$  równań opisujących spadek ciśnienia w łukach sieci za pomocą wartości ciśnienia w węzłach  $p$  (II prawo Kirchhoffa)



$$p_i^2 - p_j^2 = c \frac{L_k}{D_k^5} Q_k |Q_k| \quad (2)$$

gdzie  $p_i - p_j$  jest spadkiem ciśnienia w rurociągu, który tworzy łuk  $k$ , posiadającym węzeł początkowy  $i$  oraz węzeł końcowy  $j$ ,  $L_k$  jest długością rurociągu  $k$ ,  $D_k$  jest średnicą rurociągu  $k$ ,  $Q_k$  jest strumieniem gazu płynącego w rurociągu  $k$ ,  $c$  jest współczynnikiem w równaniu przepływu zależnym od składu gazu i materiału rurociągu

•  $N$  równań opisujących bilans energii chemicznej w węzłach sieci (reguła mieszania)

$$\sum_{k \in C_i} H_k Q_k = H_i \sum_{k \in C_i} Q_k \quad (3)$$

gdzie  $H_k$  jest ciepłem spalania gazu dopływającego do węzła  $i$  rurociągiem  $k$ ,  $H_i$  jest ciepłem spalania gazu w węźle  $i$ .

Równania (1) mogą być zapisane z wykorzystaniem macierzy incydencji węzłów i łuków o wymiarach  $(N \times M)$ . Obliczenia hydrauliczne sieci rozpoczynają się od założenia przybliżonych przepływów w łukach sieci, które w kroku startowym nie muszą spełniać równania (1). W kolejnych krokach obliczeń wyznaczane są nowe wartości ciśnienia w węzłach sieci, rozwiązując układ równań w zapisie macierzowym

$$Jp = F \quad (4)$$

gdzie  $J$  jest macierzą Jacobiego o wymiarach  $(N \times N)$ ,  $p$  jest wektorem wartości ciśnienia w węzłach sieci  $(N \times 1)$ ,  $F$  jest wektorem prawych stron układu równań  $(N \times 1)$ , wyrażających niezbilansowanie przepływów w węzłach sieci. Po tym, jak obliczone zostają nowe wartości ciśnienia w węzłach sieci, nowe przepływy w łukach sieci wyznaczane są z równania (2). Macierz  $J$  jest macierzą rozrzedzoną, dlatego układ równań (4) rozwiązywany jest z wykorzystaniem technik faktoryzacji macierzy, opartych na permutacjach zbioru węzłów i pozwalających przechowywać w pamięci komputera tylko niezerowe elementy macierzy  $J$ . Jednocześnie rozwiązywane są równania opisujące elementy nieliniowe. Dysponując nowymi przepływami w łukach sieci możemy określić ciepło spalania w węzłach sieci z równania

$$GH = b \quad (5)$$

gdzie  $G$  jest macierzą współczynników o wymiarach  $(N \times N)$ , zawierającą przepływy w łukach sieci,  $H$  jest wektorem wartości ciepła spalania w węzłach  $(N \times 1)$ ,  $b$  jest wektorem prawych stron, zawierającym sumy iloczynów ciepła spalania i strumienia gazu  $(N \times 1)$ . Rozwiązanie układu równań (5) jest możliwe jedynie przy niezerowych przepływach w łukach sieci.

Algorytm śledzenia zmian jakości gazu w sieci możemy zatem opisać następującą procedurą:

- 1) przyjmij startowe wartości ciepła spalania w węzłach sieci,
- 2) wyznacz ciśnienia w węzłach sieci (równanie (4)) i przepływy w łukach sieci (równanie (2)),
- 3) wyznacz nowe wartości ciepła spalania w węzłach sieci (równanie (5)),
- 4) wyznacz nowe wartości ciśnienia w węzłach sieci i przepływy w łukach sieci.

Powtarzaj wykonywanie instrukcji 3) i 4) aż do spełnienia warunku zaniedbywanych zmian ciepła spalania w kolejnych krokach.

## Wyniki symulacji procesu zatłaczania wodoru do sieci gazowej na przykładzie wybranej sieci dystrybucyjnej w warunkach polskich

Badania symulacyjne przeprowadzono dla sieci gazowej Chełmna [Osiańczak i in., 2012]. Sieć składa się z 390 węzłów, 416 rurociągów i 1167 przyłączy. Sieć jest zasilana z jednej stacji gazowej wysokiego ciśnienia o nominalnej przepustowości 9000 m<sup>3</sup>/h i 18 stacji średniego ciśnienia, w tym czterech o przepustowości odpowiednio 2000 m<sup>3</sup>/h, 3500 m<sup>3</sup>/h, 600 m<sup>3</sup>/h oraz 1600 m<sup>3</sup>/h, jednego punktu redukcyjno-pomiarowego o przepustowości 60 m<sup>3</sup>/h i trzynastu stacji redukcyjno-pomiarowych zlokalizowanych bezpośrednio u odbiorców. Strukturę sieci w formie mapy tematycznej GIS przedstawiono na rys. 6. Sieć gazowa, której odcinki oznaczono kolorem czerwonym, jest siecią średniego ciśnienia, natomiast odcinki oznaczone kolorem niebieskim należą do sieci niskiego ciśnienia. Łączna długość gazociągów wynosi 41,2 km, natomiast długość przyłączy wynosi 19,5 km. Krótką charakterystykę sieci przedstawiono w tabeli 1. Charakterystyczną cechą sieci jest jej nieplanarność, spowodowana dużymi różnicami wysokości położenia terenu. Rzędne węzłów mają wartości od 24,7 do 86,4 m.

Tabela 1. Charakterystyka dystrybucyjnej sieci gazowej w Chełmnie

| Rodzaj sieci            | Średniego ciśnienia | Niskiego ciśnienia |
|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Długość gazociągów (km) | 13,4                | 27,8               |
| Długość przyłączy (km)  | 3                   | 16,5               |
| Liczba przyłączy        | 119                 | 1124               |
| Zakres średnic          | DN50-DN450          | DN63-DN250         |

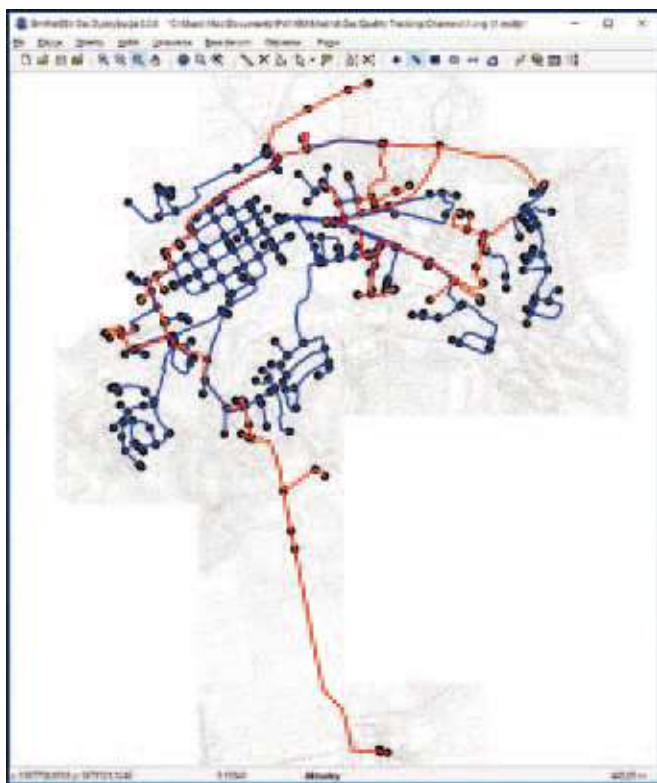
Obliczenia symulacyjne sieci przeprowadzono z wykorzystaniem autorskiego pakietu oprogramowania SimNet SSV dla parametrów pracy sieci, odpowiadających warunkom szczytowego zapotrzebowania na gaz w okresie zimowym 2012 r. oraz dla rzeczywistego składu gazu ziemnego wysokometanowego rozprzodzanego siecią (tabela 2.).

Tabela 2. Dane dotyczące składu gazu

| Składnik                             | Udział molowy (%) |
|--------------------------------------|-------------------|
| C1                                   | 96,640            |
| C2                                   | 1,240             |
| C3                                   | 0,300             |
| C4                                   | 0,150             |
| C5                                   | 0,050             |
| C6                                   | 0,400             |
| N <sub>2</sub>                       | 1,880             |
| CO <sub>2</sub>                      | 0,340             |
| Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )         | 0,749             |
| Gęstość względna                     | 0,579             |
| Ciepło spalania (MJ/m <sup>3</sup> ) | 39,745            |
| Wartość opałowa (MJ/m <sup>3</sup> ) | 35,842            |
| Liczba Wobbego                       | 52,23             |

Rezultaty symulacji pokazały minimalne wartości ciśnienia w sieciach średniego i niskiego ciśnienia, wynoszące odpowiednio 203,4 kPa oraz 2,0 kPa. Jednocześnie symulacja pozwoliła wskazać 8 miejsc w sieci gazowej niskiego ciśnienia o niedotrzymanych parametrach przepływu, tj. przekroczonych prędkościach przepływu gazu, z których najwyższą miała wartość 11,7 m/s. Są to miejsca ewidentnych przewężeń na sieci (tzw. wąskich gardeł), którymi okazały się krótkie odcinki sieci, zlokalizowane w dzielnicy Stare Miasto.

Rys. 6. Struktura sieci gazowej w Chełmnie



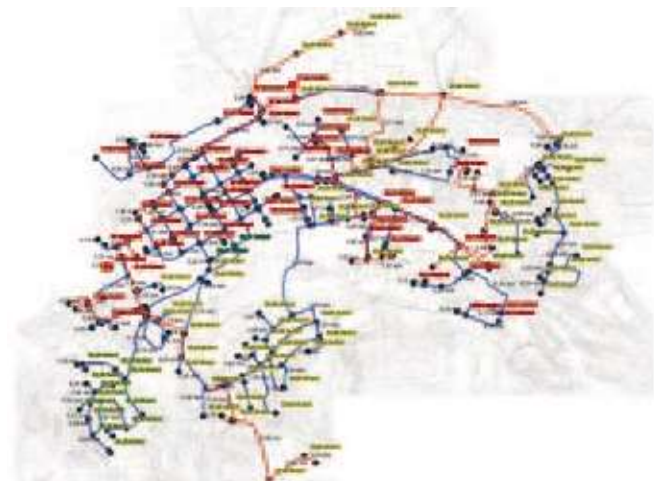
W drugim etapie badań przeprowadzono symulację rozprzysięgu mieszaniny gazu ziemnego z wodorem w sieci, zakładając dwa warianty procesu zatłaczania wodoru: dostarczany jest do sieci w ilości odpowiednio 2% oraz 10% udziału objętościowego na wybranej stacji gazowej średniego ciśnienia (oznaczonej na mapie czerwonym kwadratem). Mapy tematyczne prezentujące dystrybucję ciepła spalania gazu w sieci dla ww. wariantów pracy sieci przedstawiono na rys. 7 i 8.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że minimalne wartości ciepła spalania w sieci w wariancie pierwszym i drugim wynoszą odpowiednio 39,383 MJ/m<sup>3</sup> oraz 37,936 MJ/m<sup>3</sup>. Należy zwrócić uwagę, że minimalna wartość ciepła spalania gazu ziemnego grupy E, przesyłanego siecią gazową, wynosi 38,000 MJ/m<sup>3</sup>, co pozwala stwierdzić, iż lokalizacja miejsca zatłaczania w połączeniu ze składem gazu obecnie rozprzysięganego siecią uniemożliwia zatłaczanie wodoru w analizowanej sieci w ilości 10% udziału objętościowego. Kolorem czerwonym na rys. 8. oznaczono węzły, w których wartość kaloryczności gazu jest poniżej poziomu dopuszczalnego (38,000 MJ/m<sup>3</sup>) lub na krytycznie niskim poziomie (przyjęto poniżej 38,170 MJ/m<sup>3</sup>).

Rys. 7. Rozkład ciepła spalania mieszaniny gaz ziemny/wodór w wariancie pierwszym (98%/2%).



Rys. 8. Rozkład ciepła spalania mieszaniny gaz ziemny/wodór w wariancie drugim (90%/10%).



## Wnioski

W artykule przedstawiono dostępne w literaturze wyniki badań w zakresie możliwości zatłaczania wodoru do sieci gazowej, pozwalające na szacunkowe określenie dopuszczalnych stężeń wodoru w elementach systemu gazowniczego. Dopuszczalne stężenie wodoru w sieci gazowej powinno być określone indywidualnie dla każdej sieci, biorąc pod uwagę strukturę sieci, miejsce zatłaczania, skład gazu ziemnego oraz wyposażenie odbiorców w różne kategorie odbiorników gazu. Oczekowe struktury sieci przesyłowych i dystrybucyjnych oraz nierównomierność poboru gazu w praktyce powodują konieczność przeprowadzenia szczegółowych obliczeń hydraulicznych sieci, z wykorzystaniem symulatorów pozwalających na śledzenie zmian składu gazu w celu określenia dopuszczalnej ilości wodoru zatłaczanego do sieci.

**Maciej Chaczykowski, Andrzej J. Osiadacz**

Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Politechnika Warszawska