



# Analiza porównawcza rurociągów PE i stalowych w aspekcie techniczno-ekonomicznym

## *Comparative analysis of PE and steel pipelines in technical and economic aspect*

Andrzej BŁASZCZYK<sup>1</sup>, Grzegorz KOŹBA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>P.B.W. „Hydro-Pomp” Sp. z o.o., ul. Wróblewskiego 19, 93-578 Łódź, email: blaszczyk@hydropomp.com.pl

<sup>2</sup>P.B.W. „Hydro-Pomp” Sp. z o.o., ul. Wróblewskiego 19, 93-578 Łódź, email: grzegorz.kozba@hydropomp.com.pl

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono rezultaty przeprowadzonych badań hydraulicznych oraz badań stanu technicznego rurociągu solanki użytkowanego od ponad 40 lat.

Opisano szereg zagadnień związanych z jego pogarszającym się stanem technicznym i zmniejszającą się przepustowością. Wskazano czynniki wpływające na postępującą korozję oraz scharakteryzowano przyczyny zwiększania się z upływem czasu oporu hydraulicznego rurociągu.

Zgromadzone dane posłużyły do porównania zastosowania w przemyśle chemicznym rurociągów stalowych i polietylenowych do transportu solanki w aspekcie techniczno-ekonomicznym.

Analiza porównawcza rurociągu stalowego i polietylenowego wykazała zalety wykorzystania rurociągów wykonanych z PE.

**Słowa kluczowe:** korozja rurociągów stalowych; rurociągi polietylenowe; rurociągi solanki

### ABSTRACT

The article presents the results of carried out hydraulic tests and technical condition tests for over 40 years old brine pipeline.

A number of issues related to its deteriorating technical condition and decreasing bandwidth have been described. The factors influencing the progressive corrosion and the reasons for increasing the hydraulic resistance of the pipeline over time were identified.

The collected data was used to compare the use of pipelines made of steel and polyethylene for application in brine industry in terms of technical and economic.

Comparative analysis of steel and polyethylene pipeline showed advantages of the use of pipelines made of PE.

**Key words:** corrosion of steel pipelines; polyethylene pipelines; brine pipelines

Oznaczenia użyte w treści:

- $D$  [m] - średnica wewnętrzna rurociągu,
- $Q$  [m<sup>3</sup>/h] - wydajność [m<sup>3</sup>/h],
- $c$  [m/s] - prędkość przepływu solanki przez rurociąg,
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] - przyspieszenie ziemskie,
- $Dh$  [m] - wysokość strat hydraulicznych,
- $k_p$  [m/(m<sup>3</sup>/h)<sup>2</sup>] - wyznaczony z pomiarów współczynnik oporu,
- $k_r$  [m] - chropowatość bezwzględna powierzchni wewnętrznej rurociągu,
- $k_t$  [m/(m<sup>3</sup>/h)<sup>2</sup>] - teoretyczny współczynnik oporu,
- $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] - lepkość kinematyczna,
- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - gęstość medium.

### WPROWADZENIE

Z badań i analiz przeprowadzonych na rurociągach użytkowanych w przemyśle chemicznym wynika, że eksploatacja rurociągów solanki wykonanych ze stali stwarza szereg problemów, związanych nie tylko z korozją, ale przede wszystkim ze zwiększającymi się w czasie eksplo-

atacji narostami na ściankach wewnętrznych, co skutkuje wzrostem oporów hydraulicznych i co za tym idzie stratami energii zużywanej na transport medium. Alternatywą dla rurociągów stalowych mogą być rurociągi wykonane z polietylenu (PE), cechujące się małym i niezmiennym w czasie współczynnikiem oporu hydraulicznego.

### Badania stanu technicznego rurociągu stalowego

Przedmiotem omówionych niżej badań i analiz jest eksploatowany od ponad 40 lat stalowy rurociąg solanki DN 500 (508x11) o długości około 28 km, transportujący solankę o gęstości 1260 kg/m<sup>3</sup> (wartość podana przez użytkownika/inwestora) z kopalni soli do zakładów chemicznych. Obszar badań obejmował dwa główne kierunki prac:

- badania stanu technicznego rurociągu ze szczególnym uwzględnieniem wpływu korozji na dopuszczalne ciśnienia (Krakowiak i in., 2013),
- badania i obliczenia hydrauliczne mające na celu określenie możliwości zwiększenia przepustowości rurociągu (Błaszczuk i in., 2013).

### Metodyka badawcza stanu technicznego rurociągu

Zakres badań obejmował wykonanie pomiarów w warunkach terenowych oraz laboratoryjnych. W badaniach wykorzystano następujące techniki badawcze (Krakowiak i in., 2013):

- ocena wizualna,
- pomiar grubości ścianki rurociągu,
- pomiar grubości powłoki izolacyjnej,
- badania oddziaływania prądów błędzących na rurociąg,
- pomiar odczynu gruntu w pobliżu rurociągu,
- pomiar rezystywności gruntu w pobliżu rurociągu,
- badania laboratoryjne i ocena wpływu szybkości korozji oraz prędkości przepływu solanki na trwałość instalacji.

### Wyniki badań stanu technicznego rurociągu solanki

#### Ocena wizualna

W trakcie prac stwierdzono, że w części komór studni spustowych istnieją duże ubytki zarówno materiału izolacyjnego, jak i ubytki ścianki komory. W studniach występuje wyciekanie solanki z zaworów i złączy kołnierzowych. Dostająca się do wnętrza studni woda z opadów atmosferycznych lub woda gruntowa prowadzi do jej rozcieńczenia i tym samym do zwiększenia jej agresywności w stosunku do stali. Jest to przyczyną silnej korozji rurociągu od strony zewnętrznej, która jest widoczna na zamieszczonych zdjęciach (Ryc. 1 i Ryc. 2). Korozji ulegają wszystkie elementy znajdujące się w studni spustowej: zawór odcinający, zawory spustowe oraz kompensatory montażowe.

### Pomiar grubości ścianki rurociągu

Na podstawie przeprowadzonych ultradźwiękowych pomiarów grubości ścianek rurociągu solanki w wybranych miejscach (we wszystkich 49 studniach spustowych oraz w 60 wykopach odkrywających odcinki proste i łuki) stwierdzono, że najmniejsze grubości ścianek występują w studniach spustowych. Nie stwierdzono istotnego zmniejszenia grubości ścianek na łukach i odcinkach prostych, poza miejscami zlokalizowanymi w bezpośredniej bliskości studni spustowych.

Spośród wszystkich mierzonych grubości ścianek rurociągu w Tabeli 1 przedstawiono wartości najniższe, zmierzone w komorach spustowych. W Tabeli 1 podano miejsce, grubości ścianki i wartość średnią grubości ścianki dla danej lokalizacji.

**Tabela 1** - Najniższe grubości ścianek (Krakowiak i in., 2013)

**Table 1** - The lowest wall thicknesses (Krakowiak et al., 2013)

Studnia spustowa	Grubości ścianki, mm			
nr 1	8,45	8,38	8,27	Xśr = 8,74
nr 2	7,77	7,73	7,37	Xśr = 8,13
nr 6	7,20	<b>4,79</b>	<b>4,20</b>	Xśr = <b>5,42</b>
nr 10	<b>5,56*</b>	7,70	7,79	Xśr = 9,00
nr 13	<b>6,68</b>	<b>5,93</b>	<b>6,40</b>	Xśr = 6,94

\*Pogrubiczną czcionką oznaczono wartości mniejsze niż wyliczona minimalna (bez uwzględnienia naddatków na korozję) grubość ścianki 6,79 mm dla ciśnienia 2,5 MPa.

W większości studni zaobserwowano bardzo silną korozję rurociągów od strony zewnętrznej. Związane jest to z obecnością rozcieńczonej wodą solanki, która w dużo bardziej agresywnym stopniu działa na powierzchnię metalu niż stężona solanka wewnątrz rurociągu. Występuje także naturalne pełzanie solanki na połączeniach kołnierzowych znajdujących się w komorach, o czym świadczą wykwity solne na armaturze (Ryc. 1).



**Ryc. 1.** Wykwity solne w studni spustowej solanki (Krakowiak i in., 2013)

**Fig. 1.** Salt efflorescence in a brine drain chamber (Krakowiak et al., 2013)



**Ryc. 2.** Wnętrze studni spustowej solanki (Krakowiak i in., 2013)  
**Fig. 2.** Interior of a brine drain chamber (Krakowiak et al., 2013)

### Pomiar grubości powłoki izolacyjnej

Badania izolacji w każdym z wykopów wskazały, że stan izolacji jest ściśle związany z rodzajem gruntu, w którym rurociąg jest posadowiony. Grunty piaszczyste o stosunkowo grubym ziarnie, które są dobrze natlenione stwarzają warunki do utleniania izolacji. Utlenianie masy bitumicznej, która stanowi bazę pokrycia ochronnego nie zachodzi w całej masie izolacji, ale ma charakter powierzchniowy. Izolacja w tych warunkach staje się krucha i bardzo łatwo można ją zdejmować z powierzchni rurociągu. Zupełnie inna sytuacja występuje, gdy rurociąg posadowiony jest w gruncie o charakterze gliniastym. Słaby dostęp tlenu do powierzchni izolacji sprawia, że warstwa chroniąca rurociąg jest praktycznie niezmienną.

W najgorszym stanie izolacja znajduje się w studniach spustowych solanki oraz w ich sąsiedztwie.

Na odcinkach rurociągu, w wykopach usytuowanych bezpośrednio przy studni, obserwuje się obniżoną przyczepność izolacji (lub nawet jej całkowity brak) na skutek korozji powodowanej solanką ze studni (Ryc. 3). Problem dotyczy wszystkich bez wyjątku studni, które badano.



**Ryc. 3.** Korozja podpowłokowa z utratą przyczepności (Krakowiak i in., 2013)

**Fig. 3.** Sub-coating corrosion with loss of adhesion (Krakowiak et al., 2013)



**Ryc. 4.** Brak powłoki oraz widoczna utrata przyczepności izolacji do podłoża (Krakowiak i in., 2013)

**Fig. 4.** No coating and visible loss of adhesion of the insulation to the substrate (Krakowiak et al., 2013)

Ryc. 4 obrazuje stan przy wyjściu rurociągu z ziemi, na granicy ośrodków ziemia – powietrze. Powłoka uległa praktycznie całkowitej degradacji. Może być to związane z wyciekami solanki i nasycaniem terenu wodą z solą co prowadzi do przyspieszonej degradacji powłoki malarskiej.

Na degradację izolacji rurociągu należy zwrócić szczególną uwagę w okolicy zbiorników wodnych, gdzie awaria rurociągu może znacząco oddziaływać na środowisko.

### Badania oddziaływania prądów błędnych na rurociąg

Badania oddziaływania prądów błędnych (tzw. interferencji) wykonano na odcinku rurociągu znajdującym się w pobliżu zelektryfikowanej trakcji kolejowej. Miejsca pomiarów wybrano na podstawie analizy sytuacji terenowej, dokonanej pod kątem usytuowania źródła prądów błędnych i badanego obiektu.

Analiza sytuacji terenowej oraz uzyskane wyniki pomiarów wskazują, iż w kilku rejonach, prądy błędne wpływające do rurociągu w pobliżu trakcji kolejowej mogą z niego wypływać do ziemi w miejscach defektów izolacji zewnętrznej i prowadzić do korozji elektrolitycznej.

### Pomiar odczynu gruntu w pobliżu rurociągu

Odczyn gruntu w okolicy rurociągu jest parametrem niezbędnym do oceny jego korozyjności. Wykonano go pehametrem używanym do polowej, szybkiej oceny odczynu gleby. Zmierzone odczyny pH przyjmują wartości z zakresu 6,5÷7. Wyjątek stanowi miejsce o pH 4÷5.

### Pomiar rezystywności gruntu w pobliżu rurociągu

Pomiar rezystywności gruntu pozwala powiązać wilgotność gleby, zawartość soli z przypuszczalną szybkością korozji stali w tym środowisku. W Tabeli 2 zestawiono wartości rezystywności gruntu z potencjalną szybkością korozji materiału.



**Tabela 2.** Rezystywność gleby a korozja stali konstrukcyjnej (Krakowiak i in., 2013)

**Table 2.** Soil resistivity and corrosion of structural steel (Krakowiak et al., 2013)

Odporność korozyjna	Rezystywność gleby / $\Omega \times \text{cm}$	Potencjalna szybkość korozji
Niska	0 - 2000	wysoka
Średnia	2000 - 10000	średnia
Wysoka	10000 - 30000	niska
Bardzo wysoka	Ponad 30000	mało prawdopodobna korozja

### Badania laboratoryjne i ocena wpływu szybkości korozji oraz prędkości przepływu solanki na trwałość instalacji

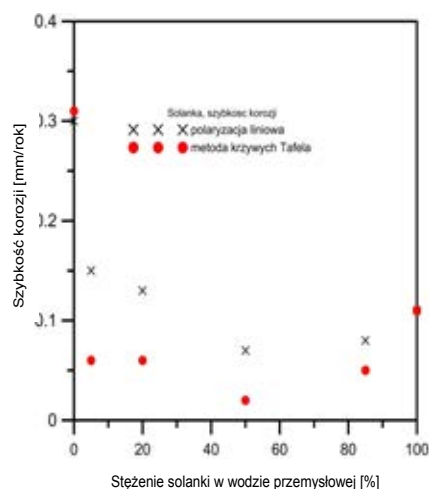
Sama stężona solanka, biorąc pod uwagę szybkość korozji materiału rurociągu w tym medium, nie stwarza poważnych problemów korozyjnych. Świadczą o tym grubości ścianki, które zostały zmierzone na prostych odcinkach rurociągu. Ubytki grubości po wieloletniej działalności rurociągu są znikome. Problemem jest korozja od strony zewnętrznej, która jest obserwowana przede wszystkim w studniach. Dzieje się tak w wyniku wyciekania solanki oraz jej naturalnego „pełzania” oraz dostawania się wody z zewnątrz (woda gruntowa oraz opady atmosferyczne), co powoduje rozcieńczanie solanki.

Wzrost stężenia soli w wodzie prowadzi do gwałtownego zmniejszenia się ilości rozpuszczonego tlenu. Porównanie szybkości korozji stali w wodzie przemysłowej (zawierającej chlorki w ilości charakterystycznej dla danego rejonu kraju) oraz solanki wskazują na ponad trzykrotnie wyższą wartość szybkości korozji w wodzie naturalnej. Roztwory zostały sporządzone przy użyciu wody przemysłowej oraz solanki o zawartości 166g NaCl na 1 litr solanki. W przypadku roztworu o zerowym stężeniu solanki użyto do badania wody przemysłowej.

Na podstawie uzyskanych danych laboratoryjnych przedstawiono wykresy zależności szybkości korozji stali od stężenia solanki w wodzie przemysłowej (Ryc. 5).

Najwyższe szybkości korozji uzyskuje się dla czystej wody przemysłowej. Wraz ze zwiększaniem stężenia solanki szybkości korozji zmniejsza się. Dla solanek o najwyższych stężeniach uzyskane szybkości korozji są równe lub niższe od akceptowalnych. Można zatem spodziewać się szybkości korozji rzędu 0,1 - 0,12 mm/rok.

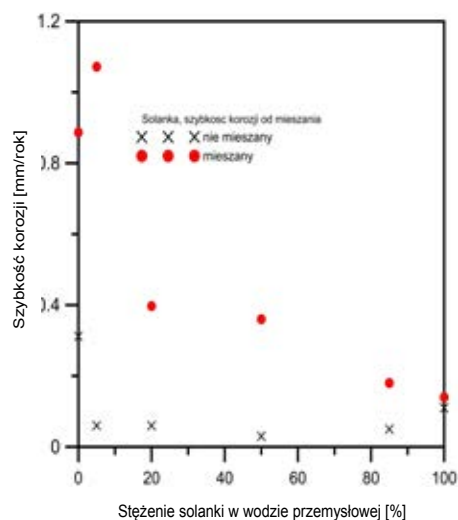
Biorąc pod uwagę obliczoną minimalną grubość ścianki dla ciśnienia roboczego 2,5 MPa równą 6,79 mm. Stwierdzono, iż mniejsza od niej grubość ścianki występuje jedynie w jednej studni spustowej. W pozostałych miejscach w których przeprowadzono pomiary nie stwierdzono grubości niższej niż progowa.



**Ryc. 5.** Szybkości korozji stali w zależności od stężenia solanki (Krakowiak i in., 2013)

**Fig. 5.** Corrosion rates of steel depending on the concentration of the brine (Krakowiak et al., 2013)

W celu określenia przewidywanego bezpiecznego czasu eksploatacji rurociągu dla zakładanego maksymalnego przepływu 900 m<sup>3</sup>/h przeprowadzono w laboratorium badania szybkości korozji w solance, wykorzystując w tym celu metodę krzywych Tafela, przy mieszanym roztworze symulującym przepływ (Ryc. 6).



**Ryc. 6.** Szybkości korozji stali w zależności od stężenia solanki i intensywności mieszania (Krakowiak i in., 2013)

**Fig. 6.** Speed of corrosion of steel depending on concentration of brine and mixing intensity (Krakowiak et al., 2013)

Na podstawie uzyskanych wyników oszacowano szybkość utraty grubości ścianek na 0,26 mm/rok. Należy przy tym pamiętać, że są to najwyższe możliwe wartości, które charakteryzują powierzchnię pozbawioną produktów korozji, ulegających niszczeniu z najwyższą możliwą szybkością. Z czasem powstające produkty korozji ograniczają szybkość korozji stabilizując ją na dużo niższym poziomie.

## BADANIA HYDRAULICZNE RUROCIĄGU STALOWEGO SOLANKI

### Metodyka badań hydraulicznych (Błaszczyk i in., 2013)

Pomiary wykonywano w trakcie normalnej pracy instalacji, gdy solankę tłoczono z kopalni soli do zakładów chemicznych.

Podstawowe parametry rurociągu:

Średnica rurociągu ..... DN500 (508x11)  
Długość rurociągu ..... ~ 27800 m  
Rzędna początku (kolektor pompowni) ..... 131,14 m  
Rzędna końca (króciec ssawny pompy P-0) ..... 93,34 m  
Podane przez użytkownika/inwestora parametry solanki:

- gęstość  $\rho = 1260 \text{ kg/m}^3$ ,
- lepkość kinematyczna  $\nu = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

W trakcie dokonywania pomiarów rejestrowano następujące wielkości:

- $Q \text{ [m}^3/\text{h]}$  - przepływ odczytany z przepływomierza pompowni solanki,
- $p_{is} \text{ [bar]}$  - ciśnienie w rurociągu przesyłowym w miejscach studni odpowietrzających,
- $p_{kk} \text{ [bar]}$  - ciśnienie w kolektorze tłocznym pompowni,
- $P_{s-p-0} \text{ [bar]}$  - ciśnienie na ssaniu pompy podporowej.

Przeprowadzono pomiary różnic ciśnień pomiędzy następującymi kolejnymi odcinkami rurociągu przesyłowego: KK-S1, S1-S2, S2-S3, S3-S4, S4-S13, S13-S17, S17-S21, S21-S37, S37-S45, S45-P-0, gdzie:

- KK - przetwornik ciśnienia na kolektorze tłocznym pompowni,
- P-0 - króciec ssawny pompy P-0.

Zgodnie z zależnościami podanymi poniżej na podstawie wyników pomiarów różnic ciśnień, wartości prze-

pływów  $Q$  oraz pomierzonych rzędnych miejsc pomiarów „z”, wyliczono straty wysokości ciśnienia  $\Delta h_{0-1}$  na badanych odcinkach oraz współczynniki oporu przepływu z pomiarów  $k_p$  stanowiące niezależną od przepływu miarę oporu hydraulicznego badanych odcinków.

$$\Delta h_{0-1} = \left( \frac{p_0 - p_1}{\rho g} \right) + (z_0 - z_1) + \left( \frac{c_0^2 - c_1^2}{2g} \right) \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } c = \left( \frac{4Q}{\pi D^2} \right) \quad (2)$$

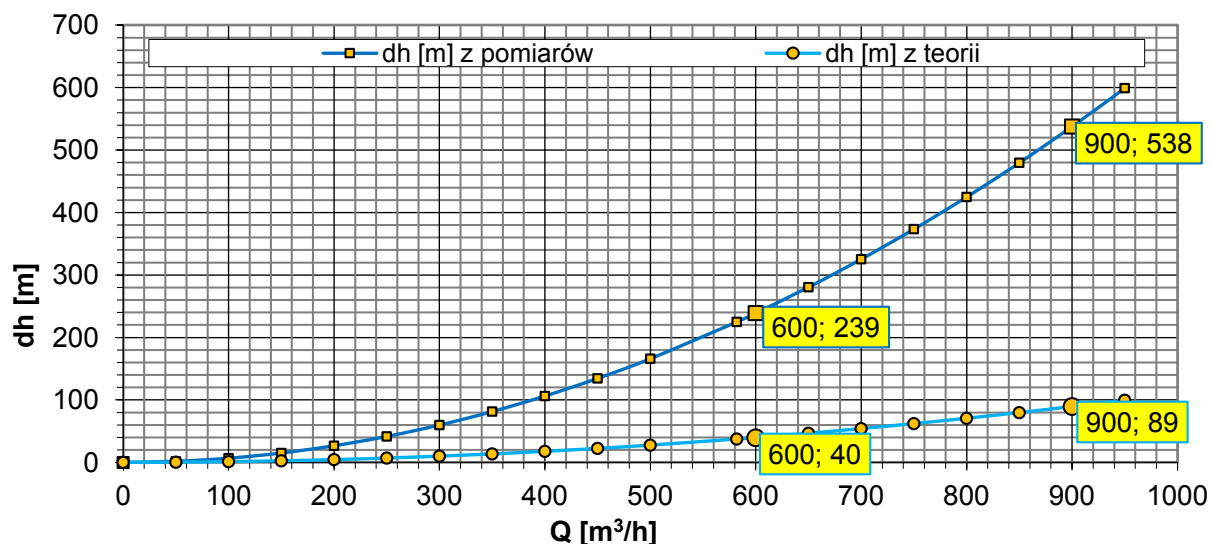
$$k_p = \frac{\Delta h_{0-1}}{Q^2} \text{ [m/(m}^3/\text{h)}^2] \quad (3)$$

W celu interpretacji wyników doświadczalnych dla wszystkich badanych odcinków, jak również dla całej długości rurociągu przesyłowego, dla których wyznaczono na podstawie pomiarów współczynniki oporu  $k_p$ , przeprowadzono obliczenia teoretycznych współczynników oporu  $k_t$ . Obliczenia wykonano dla wartości chropowatości bezwzględnej  $k = 0.1 \text{ mm}$  odpowiadającej nowemu rurociągowi.

### Wyniki badań i obliczeń hydraulicznych rurociągu solanki

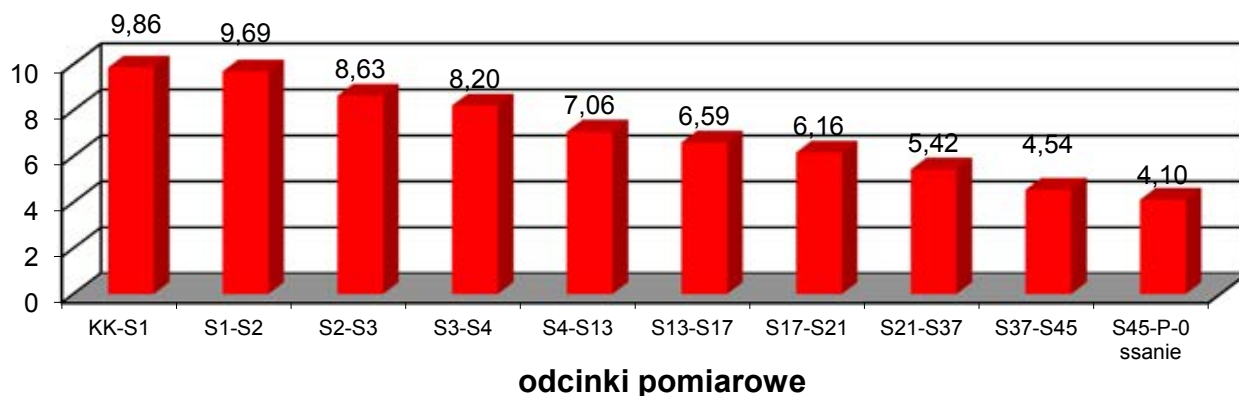
Przeprowadzono porównanie wyników badań hydraulicznych i obliczeń teoretycznych. Wyznaczony na podstawie pomiarów współczynnik oporu  $k_p = 6,55 \cdot 10^{-4} \text{ [m/(m}^3/\text{h)}^2]$  całego rurociągu (od KK do P-0) porównano ze współczynnikiem oporu  $k_t = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ [m/(m}^3/\text{h)}^2]$  wyliczonym teoretycznie.

Iloraz współczynników oporu całego rurociągu:  $k_p/k_t = 6,23$  określa krotność wzrostu strat wysokości na badanym rurociągu w stosunku do analogicznego rurociągu o tej samej średnicy i długości, lecz o chropowatości bezwzględnej ścianek  $k=0,1 \text{ mm}$ .



Ryc. 7. Porównanie dynamicznych charakterystyk oporu hydraulicznego  $dh=f(Q)$  rurociągu solanki od kopalni soli do zakładów chemicznych, z pomiarów oraz dla obliczeń teoretycznych dla analogicznego nowego rurociągu o chropowatości względnej  $k=0,1 \text{ mm}$  (Błaszczyk i in., 2013)

Fig. 7. Comparison of dynamic characteristics of hydraulic resistance  $dh=f(Q)$  brine pipeline from salt mine to chemical plants, from measurements and for theoretical calculations for analogous new pipeline with relative roughness  $k=0.1 \text{ mm}$  (Błaszczyk et al., 2013)



**Ryc. 8.** Iloraz współczynnika strat dla mierzonych odcinków rurociągu z pomiarów ( $k_p$ )

i teoretycznego współczynnika strat ( $k_t$ ) dla nowego rurociągu o chropowatości względnej  $k_r=0,1m$  (Błaszczyk i in., 2013)

**Fig. 8.** Quotient of loss coefficient for measured pipeline sections from measurements ( $k_p$ ) and theoretical loss coefficient ( $k_t$ ) for a new pipeline with relative roughness  $k_r=0,1m$  (Błaszczyk et al., 2013)

Na Ryc. 7 przedstawiono porównanie wykresów strat wysokości w funkcji przepływu dla rurociągu badanego i dla analogicznego nowego rurociągu o tej samej średnicy oraz długości, lecz o chropowatości bezwzględnej ścianek  $k=0,1mm$ .

Z wykresu wynika znaczny wzrost oporów hydraulicznych w stosunku do analogicznego nowego rurociągu.

Przeprowadzono analizę oporów hydraulicznych obecnie eksploatowanego rurociągu DN500 i analogicznego nowego rurociągu o  $k=0,1mm$  dla wydajności  $900 m^3/h$ .

Wykres z Ryc. 8 ilustruje rozkład wzrostu współczynnika oporów hydraulicznych dla poszczególnych odcinków wzdłuż badanego rurociągu przesyłowego solanki. Największe wzrosty współczynników oporu hydraulicznego występują na początku rurociągu, zmniejszając się stopniowo wraz

z odległością od kopalni osiągając najmniejsze wartości na końcu rurociągu przed zakładami chemicznymi. Powyższe wnioski z badań potwierdzone zostały podczas oględzin fragmentów wyciętych z rurociągu w trakcie likwidacji armatury odcinającej kilku studni spustowych.

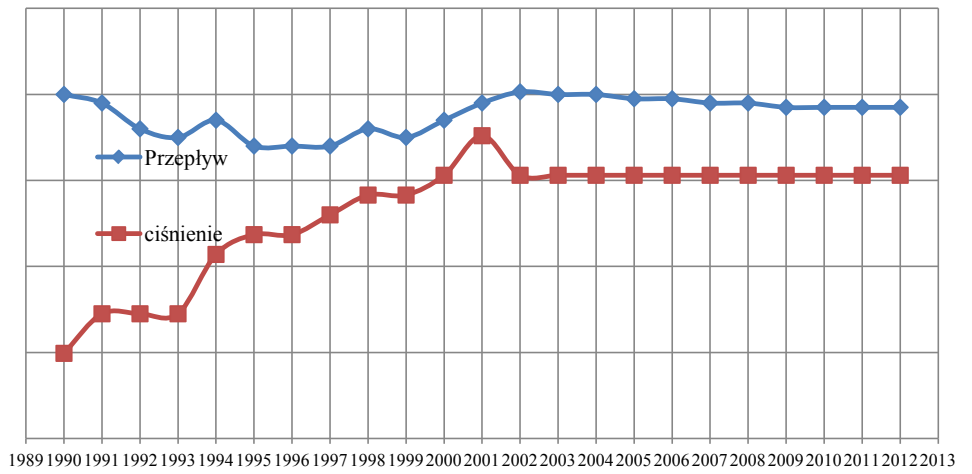
Wzrost współczynnika strat ciśnienia  $k_p$ , będącego miarą oporów rurociągu w stosunku do założeń obliczeniowych powoduje ograniczenie przepustowości uniemożliwiające oczekiwane przez użytkownika zwiększenie strumienia objętości przesyłanej solanki do  $900 m^3/h$  bez budowy pompowni pośrednich, oraz generuje wysokie straty energii potrzebnej do przetransportowania medium.

Powodem wzrostów oporu w badanym stalowym rurociągu są narosty na jego wewnętrznych ściankach o znacznych rozmiarach, które przyjmują formy spłaszczonych piramid



**Ryc. 9.** Narosty na ściankach wewnętrznych rurociągu solanki DN500

**Fig. 9.** Accretions on the inside walls of the brine pipeline DN500



Ryc. 10 - Przebiegi wydajności i ciśnienia wybranej instalacji solanki notowanych w latach 1990-2012 (ze względu na tajemnicę firmy użytkownika/inwestora dokładnych wartości liczbowych nie podano)

Fig. 10 - Graph of efficiency and pressure of the selected brine installation, recorded in the years 1990-2012 (due to the secret of the user/investor company, exact numerical values are not given)

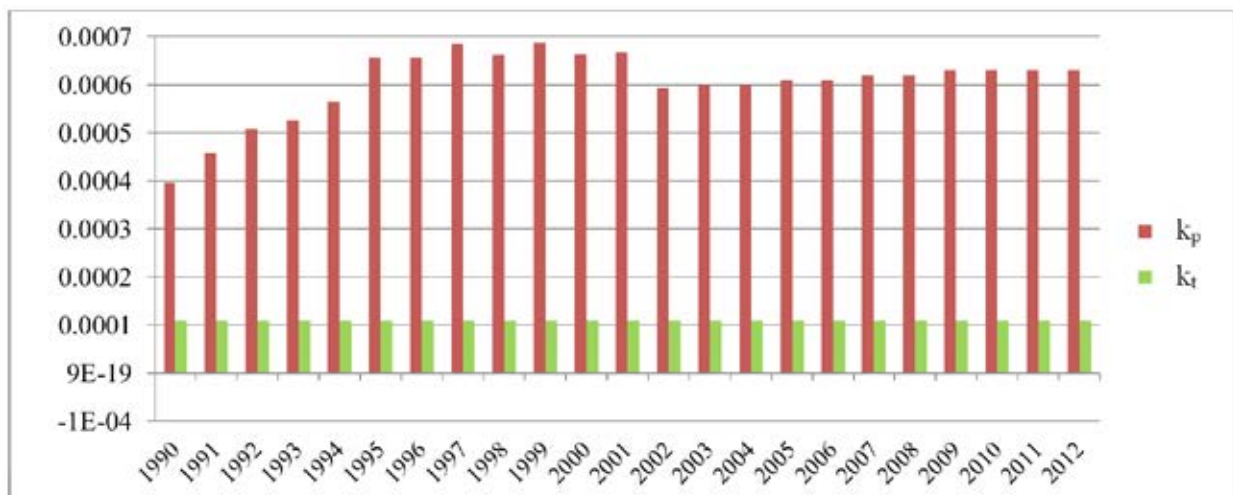
zwróconych ostrzami przeciwnie do kierunku przepływu, albo formy zafalowań o ostrych grzbietach poprzecznych do osi rurociągu. Narosty nabudowują się w obecności związków żelaza (Ryc. 9).

Bazując na notowanych w latach 1990-2012 hydraulicznych parametrach pracy rurociągu (Ryc. 10) oraz znając dane geometryczne rurociągu i parametry solanki wyliczono współczynniki oporu  $k_p$ , będące miarą oporu hydraulicznego dla lat 1990-2012 oraz dla porównania wyliczono odpowiednie teoretyczne współczynniki oporu  $k_t$  (dla chropowatości bezwzględnej  $k=0.1\text{mm}$ ) i przedstawiono na wykresie (Ryc. 11). Wykres obrazuje charakter zmian w czasie oporów hydraulicznych, które w porównaniu z nowym rurociągiem osiągają bardzo znaczne wartości. Opory spowodowane są osadzeniem się na ściankach specyficznie ukształtowanych narostów widocznych na Ryc. 9.

### Wnioski z badań rurociągu solanki

Jak wynika z przeprowadzonych badań stanu technicznego stalowego rurociągu przetłaczającego solankę, korozja nie musi stanowić problemu. Należy monitorować i utrzymywać właściwy stan zabezpieczenia antykorozyjnego, zwłaszcza w studniach spustowych i odpowietrzających oraz na wejściach w grunt i wyjściach z gruntu. Konieczne jest też zabezpieczenie szczelności komór studni spustowych i odpowietrzających tak, by nie narażała znajdujących się tam fragmentów rurociągu i armatury na kontakt z wodą lub agresywnym roztworem solanki o niskich stężeniach (Krakowiak i in., 2013).

Krytycznym problemem jest narastanie na wewnętrznych ścianach stalowego rurociągu struktur zawierających związki żelaza, które bardzo dławią przepływ. Uniemożliwia to oczekiwane przez użytkownika zwiększenie strumienia objętości



Ryc. 11 - Porównanie współczynników oporu rurociągu  $k_p$  i  $k_t$  dla parametrów hydraulicznych notowanych w latach 1990 ÷ 2012

Fig. 11 - Comparison of pipeline resistance coefficients  $k_p$  and  $k_t$  for hydraulic parameters, recorded in the years 1990-2012



przesyłanej solanki do 900 m<sup>3</sup>/h bez budowy pompowni pośrednich i znacznie zwiększa koszty energii przetwarzania solanki (Błaszczuk i in., 2013).

Wydaje się celowe rozważenie budowy rurociągów do transportu solanki z innych materiałów niż stal. Powinny to być materiały, które cechują się małym i niezmiennym w czasie współczynnikiem oporu hydraulicznego oraz odporne na zarastanie ścianek wewnętrznych. Materiałem który spełnia te kryteria jest polietylen (PE).

Przykładem potwierdzającym powyższe cechy jest polietylenowy rurociąg zrzutowy solanki do Zatoki Puckiej w Kosakowie. Podczas ponad 8 lat eksploatacji rurociąg PE100 SDR11 PN 16 DN355 wykazuje stałe parametry przepływowe, co świadczy o braku zjawiska zarastania i potwierdza niezmiennosc w czasie współczynnika chropowatości bezwzględnej.

Rurociągi PE charakteryzują się całkowitą odpornością na korozję, w tym na oddziaływanie solanki i agresywnego środowiska gruntowego występującego na przykład w obrębie równin torfowych i bagiennych. Nie wymagają żadnych dodatkowych zabezpieczeń ani od wewnątrz, ani od zewnątrz. Charakteryzują się całkowitą odpornością na korozję wżerową, powodowaną działaniem tzw. prądów błędzących (Rządkowski, 2004).

Wysoka odporność na działanie chemikaliów potwierdzona została w ISO/TR 10358.

**Dla stalowych rurociągów solankowych ze względu na znaczne pogarszanie się w czasie parametrów hydraulicznych istnieje konieczność podnoszenia ciśnienia dyspozycyjnego lub budowy pompowni pośrednich.**

#### PORÓWNANIE KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA RUROCIĄGU STALOWEGO I POLIETYLENOWEGO (KOŹBA, MAKSYMOWICZ, 2015)

##### 1. Koszty inwestycyjne

Porównanie przeprowadzono dla rurociągu solankowego, który był przedmiotem badań opisanych w poprzednich roz-

działach, na odcinku z kopalni soli do zakładów chemicznych. Wykorzystując dane z badania stanu technicznego istniejącego rurociągu stalowego oraz przeprowadzone analizy hydrauliczne dla analogicznych warunków, dobrano parametry rurociągu PE.

Do porównania przyjęto rury stalowe DN 508x11 oraz rury PE100 SDR 9 PN20 560x62,5. Ceny rur stalowych 682,1 zł/mb i cenę rur z PE 935,7 zł/mb przyjęto na podstawie cen podanych przez producentów.

Na Ryc. 12 przedstawiono porównanie kosztów inwestycyjnych dla rurociągu solankowego o długości 28 km w wykonaniu stalowym i PE (Kozba, Maksymowicz, 2015).

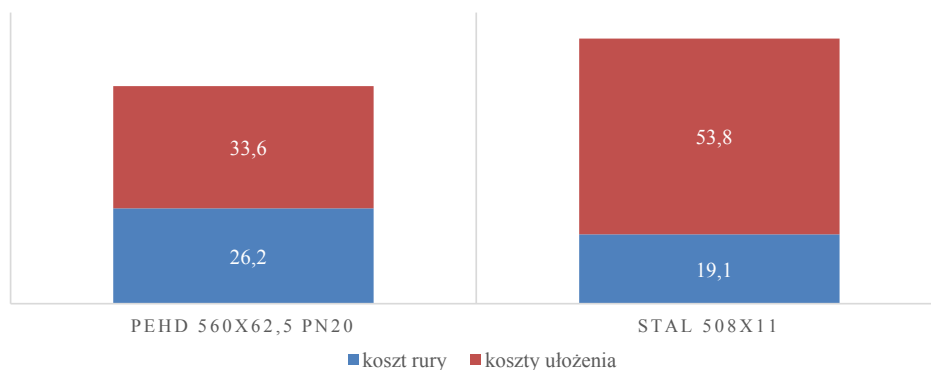
##### 2. Projektowanie i układanie

W procesie projektowania rurociągów stalowych należy uwzględnić naddatek ścianki na ewentualną korozję zewnętrzną i wewnętrzną, zaprojektować ochronę anodową lub katodową. Biorąc pod uwagę tendencje rurociągów stalowych do znacznego zmniejszenia przepustowości należy przewidzieć konieczność podnoszenia ciśnień dyspozycyjnych. Są to dodatkowe koszty, które nie wystąpią w przypadku zastosowania rurociągów polietylenowych.

Ze względu na znacznie większe wartości przyrostów i spadków ciśnienia dla rurociągów stalowych niż polietylenowych na skutek występowania zjawiska uderzenia hydraulicznego (Kodura, 2018) koszt elementów zabezpieczających będzie większy dla rurociągów stalowych niż dla rurociągów PE.

Zarówno dla rurociągów stalowych jak i PE istnieje możliwość uzyskania zmian kierunku poprzez łagodne wyginanie w trakcie układania. Dla rurociągów PE minimalne promienie gięcia  $R=20\div30$  DN będą znacznie mniejsze niż dla rurociągów stalowych.

Rurociągi stalowe dostarczane są w odcinkach 11 m, a PE mogą być dostarczane w odcinkach 15 m, co przyspiesza realizację, poprzez minimalizację liczby połączeń.



**Ryc. 12.** Graficzne porównanie kosztów inwestycyjnych dla rurociągu solankowego o długości 28 km w wykonaniu stalowym i PE (Kozba, Maksymowicz, 2015)

*Fig. 12. Graphic comparison of investment costs for a brain pipeline with a length of 28 km in steel and PE versions (Kozba, Maksymowicz, 2015)*





**Ryc. 13.** Zapotrzebowanie na energię konieczną do przesyłu solanki rurociągiem stalowym w poszczególnych latach okresu 1990÷2012.

**Fig. 13.** Demand for energy necessary to transfer brine through a steel pipeline in individual years of the period 1990÷2012.

Rurociągi stalowe łączone są poprzez spawanie. Miejsca połączeń wymagają specjalistycznych badań (radiograficznych lub ultradźwiękowych) i zabezpieczeń powierzchniowych. Zgrzewanie doczołowe rurociągów PE gwarantuje jednorodność materiałową, ciągłość i wytrzymałość rurociągu. Strefa zgrzewu rurociągów PE nie wymaga żadnych dodatkowych operacji (malowanie, izolowanie itp.).

W przypadku układania rurociągów w trudnych warunkach gruntowych (np. szkody górnicze, grunty niestabilne) rurociągi stalowe wymagają zastosowania kompensatorów. Dla rurociągów PE nie ma takiej potrzeby.

Możliwość pokonywania przeszkód terenowych z wykorzystaniem przewiertów, czy techniki zatapiania rurą stalową lub polietylenową znacznie ułatwia i przyspiesza prowadzenie prac. Do realizacji tego typu przekroczeń wybierany jest przede wszystkim polietylen.

### 3. Koszty eksploatacyjne

#### a) Koszty remontów i awarii

W analizie kosztów cyklu życia nie uwzględniono kosztów remontów i awarii, należy jednak wspomnieć iż tu istnieje wyraźna przewaga rurociągów wykonanych z PE w porównaniu do stalowych, bowiem nie ulegają one korozji, są bardziej odporne na uderzenia hydrauliczne (Kodura, 2018) i zachowują szczelność również w trudnych warunkach gruntowo wodnych.

#### b) Koszty energii

Na podstawie notowanych w latach 1990÷2012 hydraulicznych parametrach pracy rurociągu solanki, dokonano analizy zapotrzebowania na energię dla rurociągu stalowego. Dla tych samych wymaganych przepływów określono ciśnienia tłoczenia w przypadku gdyby rurociąg wykonany został z polietylenu i określono zapotrzebowanie na energię.

Oszacowanie kosztów eksploatacyjnych transportu solanki rurociągiem stalowym

Korzystając z wykresu (Ryc. 10) parametrów hydraulicznych notowanych w latach 1990 ÷2012 określono zapotrzebowanie na energię w poszczególnych latach.

Do obliczeń przyjęto:

- gęstość  $\rho = 1260 \text{ kg/m}^3$ ,
- sprawność całkowita zespołu pompowego  $\eta = 0,8$ .

Wynik przedstawiono na wykresie (Ryc. 13).

**Sumaryczne zużycie energii dla rurociągu oszacowano na 80 020 MWh.**

*Oszacowanie kosztów eksploatacyjnych transportu solanki dla tych samych strumieni przepływu jak w latach 1990÷2012 dla rurociągu polietylenowego.*

Korzystając z wymaganego przepływu dla poszczególnych lat, określono wymagane ciśnienie dyspozycyjne dla rurociągu polietylenowego PE100 SDR 9 PN20 560x62,5 i na tej podstawie oszacowano zapotrzebowanie na energię dla poszczególnych lat.

**Dla rurociągów PE współczynnik chropowatości względnej wynosi  $k=0,01\text{mm}$  jest niezmienny w czasie.**

**Nie występuje kumulacja osadów co potwierdzają doświadczenia na KPMG Kosakowo i PGWIR.**

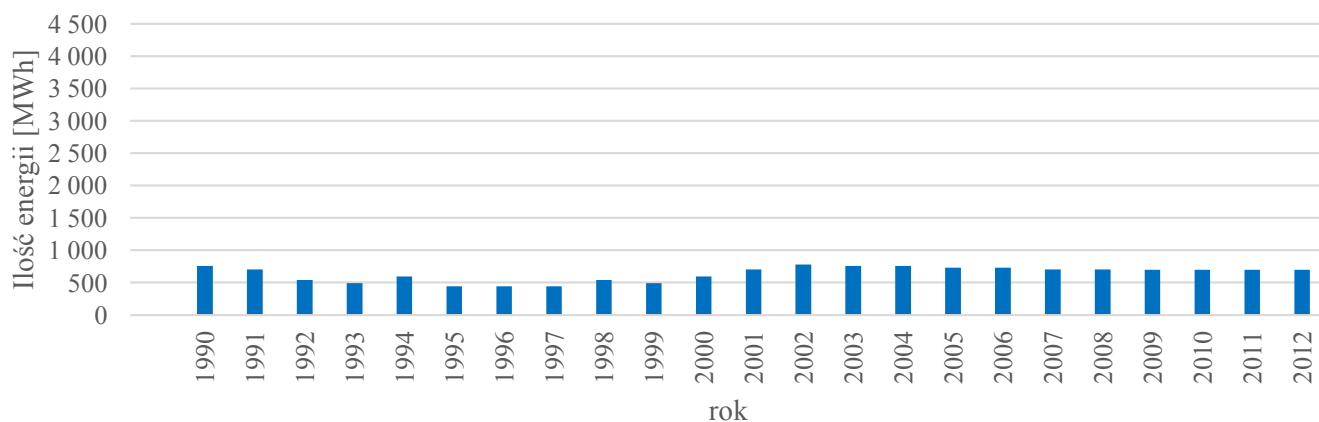
Do obliczeń przyjęto takie same wartości gęstości medium i sprawności całkowitej zespołu pompowego.

Wynik przedstawiono na wykresie poniżej na Ryc. 14.

**Sumaryczne zużycie energii dla rurociągu PE oszacowano na 14 689 MWh.**

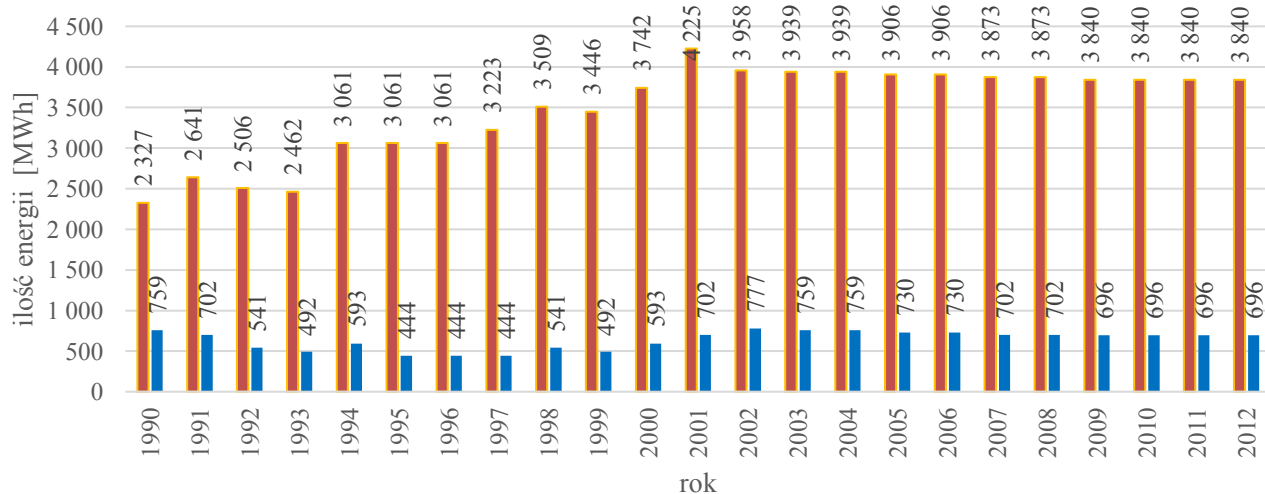
Aby uzyskać takie same wartości przepływów jak dla rury stalowej potrzebne jest znacznie niższe ciśnienie dyspozycyjne nieprzekraczające 4,2 bar.

W tej sytuacji można zastosować rurociąg PN16 SDR11 lub nawet PN10 SDR17 zamiast przyjętego PE100 SDR9 PN20, co doprowadziłoby do obniżenia kosztów inwestycyjnych.



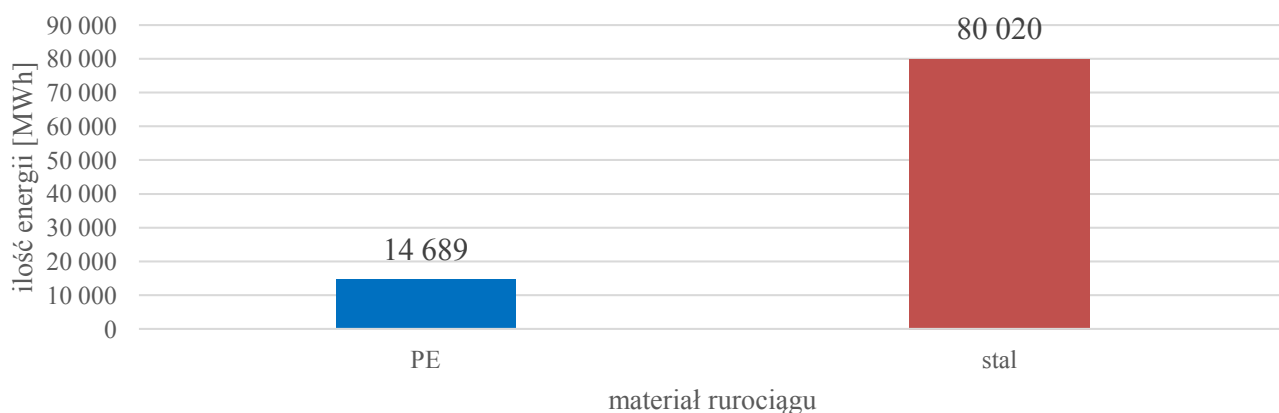
Ryc. 14. Zapotrzebowanie na energię konieczną do przesyłu solanki rurociągiem polietylenowym dla poszczególnych lat okresu 1990÷2012.

Fig. 14. Demand for energy necessary to transfer brine through the polyethylene pipeline in individual years of the period 1990÷2012.



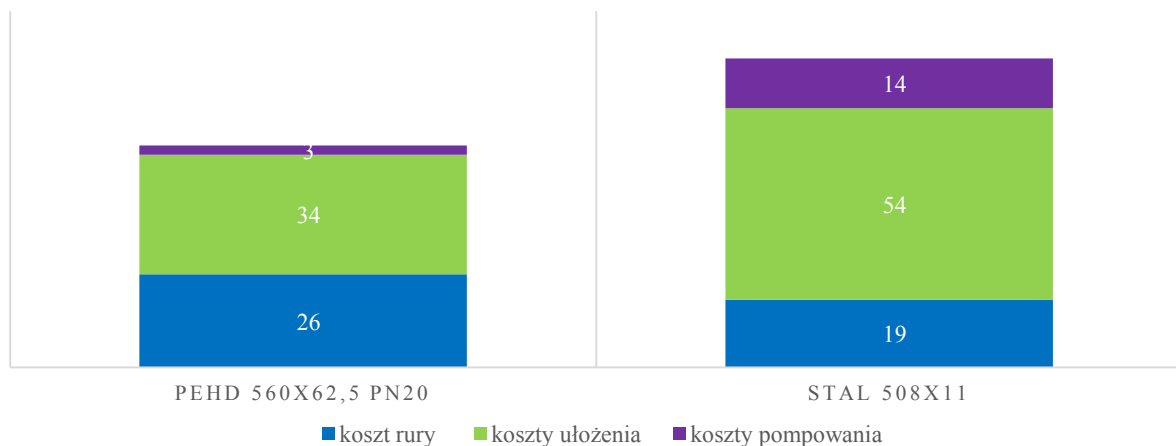
Ryc. 15. Porównanie zapotrzebowania na energię konieczną do przesyłu solanki rurociągiem stalowym i polietylenowym w poszczególnych latach okresu 1990÷2012.

Fig. 15. Comparison of energy demand necessary to transfer brine through the steel pipeline and the polyethylene pipeline in individual years of the period 1990÷2012.



Ryc. 16. Porównanie sumarycznego zapotrzebowania na energię dla rurociągu stalowego i polietylenowego w okresie 1990÷2012.

Fig. 16. Comparison of energy demand for steel and polyethylene pipelines in the period 1990÷2012.



Ryc. 17. Koszt cyklu życia w okresie 12 lat (mln zł)

Fig. 17. Life cycle cost for period of 12 years (mln zł)

### Porównanie kosztów eksploatacyjnych pracy rurociągu stalowego i polietylenowego

Na Ryc. 15 przedstawiono porównanie zapotrzebowania na energię dla rurociągu stalowego i polietylenowego w latach 1990÷2012, a na Ryc. 16 porównanie sumarycznego zapotrzebowania na energię dla obydwu rodzajów rurociągów w tym okresie.

Zastosowanie rurociągu PE zamiast rurociągu stalowego zmniejszyłoby zapotrzebowanie na moc o około 82 %.

### Podsumowanie kosztów cyklu życia

Na Ryc. 17 przedstawiono koszty cyklu życia dla okresu 12 lat. Przyjęto taki okres ponieważ autorzy dysponowali danymi parametrów pracy rurociągu w latach 1990÷2012.

Do obliczenia kosztów pompowania przyjęto cenę 174,95 zł/MWh (średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w I kwartale 2018 r.).

### WNIOSKI

1. Na podstawie przeprowadzonych analiz stalowego użytkowanego przez ponad 40 lat rurociągu solanki, stwierdzono szereg zagadnień związanych z jego pogarszającym się stanem technicznym i zmniejszającą się przepustowością.
2. Ultradźwiękowe pomiary grubości ścianek rurociągu solanki pozwoliły stwierdzić, że najmniejsze grubości ścianek występują w studniach spustowych i w ich bezpośredniej bliskości.
3. Porównanie szybkości korozji stali w wodzie przemysłowej oraz solanki wskazują na ponad trzykrotnie wyższą wartość szybkości korozji w wodzie naturalnej.
4. Współczynnik oporu rurociągu stalowego użytkowanego przez ponad 40 lat wzrósł ponad sześciokrotnie w stosunku do analogicznego nowego rurociągu.

5. Powodem wzrostów oporu hydraulicznego w badanym stalowym rurociągu są narosty na jego wewnętrznych ściankach o znacznych rozmiarach, które przyjmują formy spłaszczonej piramidy zwróconych ostrzami przeciwnie do kierunku przepływu albo formy zafalowań o ostrych grzbietach poprzecznych do osi rurociągu.
6. Dla stalowych rurociągów solankowych ze względu na znaczne pogarszanie się w czasie parametrów hydraulicznych istnieje konieczność podnoszenia ciśnienia dyspozycyjnego lub budowy pompowni pośrednich.
7. Analiza porównawcza rurociągu stalowego i polietylenowego wykazała zdecydowaną przewagę korzyści zastosowania rurociągów wykonanych z PE: cechuje się on m.in. małym i niezmiennym w czasie współczynnikiem oporu hydraulicznego oraz odpornością na zarastanie ścianek wewnętrznych i całkowitą odpornością na korozję, w tym na oddziaływanie solanki i agresywnego środowiska. Nie wymagają żadnych dodatkowych zabezpieczeń ani od wewnątrz ani od zewnątrz.
8. Przeprowadzona analiza pokazuje, że zastosowanie rurociągów polietylenowych do hydrotransportu solanki stanowi lepszą technicznie i ekonomicznie alternatywę w stosunku do rurociągów stalowych. Koszt rur jest wprawdzie większy w przypadku rur z polietylenu, ale koszt ułożenia jest wyraźnie niższy. W rozważanym przypadku różnica kosztów inwestycyjnych wyniosła około 13 mln zł, na korzyść rurociągu z PE. Zastosowanie rurociągu PE zamiast rurociągu stalowego zmniejszyłoby również zapotrzebowanie na moc o około 82 %.

### SUMMARY

Based on the results of carried out tests for over 40 years old brine pipeline, a number of issues related to its deteriorating technical condition and decreasing bandwidth have been described.



Ultrasonic measurements of the wall thickness of the steel brine pipeline made it possible to state that the smallest wall thicknesses occur in the drain wells and in their immediate vicinity.

Comparison of corrosion rate of steel in industrial water and brine indicates over three times higher value of corrosion rate in natural water.

The coefficient of resistance of the steel pipeline used for over 40 years has increased more than six times in relation to the analogous new pipeline.

For steel brine pipelines due to the significant deterioration in time of hydraulic parameters, there is a need to raise the available pressure or to build intermediate pumping stations.

Comparative analysis of steel and polyethylene pipeline showed a clear advantage of the use of pipelines made of PE: it is characterized by small and unchanged in time coefficient of hydraulic resistance and resistance to overgrowth of internal walls and total corrosion resistance, including the influence of brine and aggressive environment. They do not require any additional security neither from the inside nor from the outside.

The analysis carried out shows that the use of polyethylene pipelines for brine hydrotransport is a better technical and economical alternative in relation for steel pipelines.

#### LITERATURA / REFERENCES

- BŁASZCZYK A., KOWALEWSKI D., NAWROCKI M., WOŹNIAK D., 2013. Analiza stanu technicznego rurociągu solanki DN500. Praca niepublikowana P.B.W. „Hydro-Pomp” Łódź Sp. z o.o.
- KODURA A., 2018. Wstępna analiza porównawcza zjawiska uderzenia hydraulicznego rurociągu stalowego i polietylenowego dla układu transportującego solankę. Praca niepublikowana.
- KOŹBA G., MAKSYMOWICZ W., 2015. Porównanie kosztów cyklu życia rurociągu stalowego i polietylenowego. Opracowanie wewnętrzne P.B.W. „Hydro-Pomp” Łódź Sp. z o.o. Praca niepublikowana.
- KRAKOWIAK S., ORLIKOWSKI J., ŻAKOWSKI K., ŚLEPSKI P., 2013. Sprawozdanie z badania i analizy stanu technicznego rurociągów wody przemysłowej i solanki. Katedra Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej. Praca niepublikowana. Gdańsk
- RZĄDKOWSKI J., 2004. Uszkodzenia korozyjne rurociągów. *RUROCIĄGI* Nr 1/34/2004