

Rury preizolowane – z barierą dyfuzyjną czy bez?

Dr inż. Roman Krzywda¹

Dr inż. Bogumiła Wrzesińska¹

¹ Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Politechnika Warszawska

Słowa kluczowe: Słowa kluczowe: rury preizolowane, bariera dyfuzyjna, warstwa antydyfuzyjna, pianka PUR, wymiana gazowa, współczynnik przewodzenia ciepła, straty ciepła

Streszczenie

W trakcie eksploatacji sieci ciepłowniczych zbudowanych z rur preizolowanych następuje stopniowa utrata właściwości izolacyjnych warstwy pianki PUR. Przyczyną jest transfer gazów (poroforów) z komórek pianki do otoczenia i zastępowanie ich tlenem oraz azotem. Metodą ograniczenia tego negatywnego zjawiska jest stosowanie bariery dyfuzyjnej w płaszczu osłonowym komponentów instalacji, tj. rur, kształtek oraz złączy. Przedstawiono porównanie strat ciepła dla przykładowej sieci ciepłowniczej złożonej z systemów preizolowanych z osłoną bez i z barierą dyfuzyjną. Stwierdzono, że podczas 30-letniego okresu użytkowania, zastosowanie warstwy antydyfuzyjnej może ograniczyć straty ciepła o ok. 12%, co przekłada się na zmniejszenie kosztów ekonomicznych i środowiskowych.

Wprowadzenie

Najbardziej efektywnym, zarówno pod względem ekonomicznym jak i środowiskowym, sposobem ogrzewania budynków i wytwarzania ciepłej wody użytkowej jest tzw. ciepło systemowe. Podstawowym elementem systemów transportu tego ciepła od wytwórcy do końcowego odbiorcy są obecnie rurociągi preizolowane. W okresie od 2002 r. do 2023 r. długość sieci ciepłowniczych w Polsce wzrosła z 17 312,5 km do 22 837,8 km (URE, 2023).

Rura preizolowana zbudowana jest z kilku warstw:

1. wewnętrznej: najczęściej stalowej rury przewodowej,
2. środkowej: izolacji najczęściej ze sztywnej pianki poliuretanowej PUR w trzech typoszeręgach grubości, wraz z wbudowanymi przewodami systemu kontroli i sygnalizacji stanów awaryjnych,
3. zewnętrznej: osłony, najczęściej PE-HD,
4. oraz opcjonalnie bariery dyfuzyjnej ALU stanowiącej samodzielną warstwę lub EVOH-warstwę wbudowaną w płaszcz osłonowy.

Z punktu widzenia strat ciepła najważniejsza jest warstwa izolacyjna, z uwagi na jej grubość i najniższy współczynnik przewodzenia ciepła. Z uwagi na złożoną budowę pianki PUR, transfer ciepła przez tę warstwę odbywa się według różnych mechanizmów:

1. transport ciepła przez gaz zawarty w komórkach, który wynika z dwóch mechanizmów: przewodzenia ciepła, czyli przenoszenia energii na drodze molekularnej oraz konwekcji naturalnej wynikającej z przemieszczania się gazu w obrębie komórki. Wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów komórek pianki, udział konwekcji naturalnej w gazie wypełniającym komórki jest coraz mniejszy,
2. przewodzenie ciepła przez szkielet polimerowy,
3. promieniowanie ciepła.

Udziały wymienionych wyżej mechanizmów w sumarycznym współczynniku przenikania ciepła przez izolację, w zakresie średniej temperatury izolacji 40–80°C, oszacowano odpowiednio na ok. 60%, 20% i 20% (Kręcielewska, 2021). Jak widać największą rolę odgrywa przewodzenie w gazie. Jest to składowa, która zależy przede wszystkim od składu gazu znajdującego się we wnętrzu komórek.

Gaz wypełniający komórki pianki PUR spienianej cyklopentanem jest mieszaniną składającą się z poroforu chemicznego – CO₂, poroforu fizycznego – cyklopentanu i innych gazów występujących w ilościach śladowych, jak tlen i azot.

W Tabeli 1 zestawiono wartości współczynników przewodzenia ciepła λ wybranych gazów w kilku temperaturach. Jak widać przewodność cieplna poroforów stosowanych do spieniania poliuretanu (dwutlenek węgla, cyklopentan, n-pentan) są ok. 1,5 do 2 razy mniejsze niż dla otaczającego powietrza (tlen, azot). Współczynniki przewodzenia ciepła rosną wraz z temperaturą.

Tabela 1. Współczynniki przewodzenia ciepła gazów λ , W/mK

Gaz	Temperatura, °C			
	0	20	50	100
Dwutlenek węgla	0,0137 ⁽¹⁾ 0,0142 ⁽²⁾	0,0145 ⁽³⁾ 0,0159 ⁽²⁾	0,0194 ⁽⁴⁾	0,0214 ⁽¹⁾ 0,0201 ⁽²⁾
Cyklopentan	b.d.	0,0120 ⁽³⁾	0,0132 ⁽⁵⁾	0,0185 ⁽⁴⁾ 0,0179 ⁽⁵⁾
N-pentan	0,0130 ⁽²⁾	0,0142 ⁽²⁾	0,0163 ⁽⁵⁾	0,0218 ⁽²⁾
Tlen	0,0233 ⁽¹⁾ 0,0243 ⁽²⁾	0,0260 ⁽²⁾	0,0285 ⁽²⁾	0,0309 ⁽¹⁾ 0,0318 ⁽²⁾
Azot	0,0228 ⁽¹⁾ 0,0239 ⁽²⁾	0,0256 ⁽²⁾	0,0277 ⁽²⁾	0,0292 ⁽¹⁾ 0,0306 ⁽²⁾
Oznaczenia źródeł: ⁽¹⁾ (Hobler, 1986), ⁽²⁾ (Bretsznajder, 1962), ⁽³⁾ (Santiago-Calvo i in., 2019), ⁽⁴⁾ (Marrucho i in., 2003), ⁽⁵⁾ (Vassiliou i in., 2015).				

Tabela 2. Ciśnienie i skład gazów w komórkach niestarzanej pianki (dane z firmy Radpol Pipes)

Nr wyrobu	Ciśnienie gazu, kPa	Stężenie gazów w komórkach, % _{obj}				
		O ₂	N ₂	CO ₂	N-pentan	Cyklopentan
1	110	0,8	3,0	53,6	0,5	42,1
2	155	0,6	2,0	71,0	b.d.	25,0
3	90	2,4	4,7	55,4	0,3	37,2

Skład gazu w komórkach pianki PUR

W nowej piance PUR, porofory fizyczne i chemiczne wypełniają przeciętnie 93–98% objętości komórek, przy czym zawartość cyklopentanu nie powinna przekraczać 60%, z uwagi na pogarszanie właściwości mechanicznych pianki. W Tabeli 2 zestawiono przykładowe ciśnienia i składy gazów w komórkach pianki oznaczone w próbkach nowo wyprodukowanych rur preizolowanych (dane z firmy Radpol Pipes).

W toku eksploatacji rur preizolowanych, z uwagi na różnicę ciśnień cząstkowych gazów w piance i otaczającym środowisku, następuje dwukierunkowa dyfuzja gazów. Dwutlenek węgla i cyklopentan są stopniowo zastępowane tlenem i azotem, co powoduje wzrost współczynnika przewodzenia ciepła pianki, jako że te gazy charakteryzują się wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła λ (Tabela 1). Wymiana gazowa powoduje także spadek ciśnienia gazu w komórkach pianki. Skutkiem jest nie tylko pogorszenie właściwości termoizolacyjnych, ale także osłabienie odporności mechanicznej izolacji.

Badania wykazały, że gazowy cyklopentan charakteryzuje się bardzo małym współczynnikiem dyfuzji w piance PUR, stąd jego transfer przez piankę jest wielokrotnie mniejszy niż pozostałych gazów (Olsson i in., 2002). Dodatkowo stwierdzono, że ubytki cyklopentanu w formie gazowej są na bieżąco uzupełniane przez odparowanie ciekłego poroforu zamkniętego w komórkach pianki podczas produkcji (Kręcielewska, 2022). Przykładowo dla wyrobu numer 2 z Tabeli 2 zmierzony udział ciekłego cyklopentanu w stosunku do jego całkowitej masy zawartej w komórkach pianki wynosi 30%. Dlatego ciśnienie parcjalne¹ cyklopentanu pozostaje na zbliżonym poziomie przez długi czas, nawet jeśli jego część dyfunduje z piany. Chociaż nadmiar ciekłego cyklopentanu przyczynia się do wyższego przewodnictwa cieplnego w krótkim okresie, działa on jak rezerwuuar, który może kompensować straty gazu spowodowane dyfuzją, co stabilizuje jego stężenie w fazie gazowej i korzystnie wpływa na długoterminowe właściwości izolacyjne pianki (Olsson i in., 2002).

Zasadniczym negatywnym zjawiskiem jest zatem obniżanie zawartości CO₂ i wzrost w komórkach pianki stężenia tlenu i azotu. Wskutek wzrostu koncentracji tlenu następuje chemiczne rozrywanie łańcuchów polimerowych i degradacja struktury komórkowej pianki, efektem jest zmniejszenie wytrzymałości izolacji na ścinanie osiowe, ściskanie promieniowe, a w rezultacie odkształcanie izolacji i zmniejszanie przyczepności do rury przewodowej

(Kręcielewska, 2022). Zarówno szybkość wymiany gazowej, jak i oksydacja polimeru są dodatkowo przyspieszane przez wysoką temperaturę, a wizualnym efektem jest stopniowa zmiana barwy pianki PUR w trakcie eksploatacji.

Warstwa antydyfuzyjna jako bariera dla wymiany gazowej

Spowolnienie wymiany gazowej jest środkiem do stabilizacji właściwości izolacyjnych pianki, zarówno bezpośrednio przez zahamowanie zastępowania bardziej izolacyjnego CO₂ przez mniej izolacyjny N₂ i O₂, jak i pośrednio przez ograniczenie degradacji struktury pianki.

Zmiana właściwości termoizolacyjnych w trakcie eksploatacji rur preizolowanych związana jest z:

1. grubością warstwy izolacyjnej,
2. grubością osłony PE-HD,
3. zastosowaniem lub nie bariery dyfuzyjnej.

Wymiary rur preizolowanych określone są w PN-EN 253 (PN, 2024). Średnicy nominalnej oraz zewnętrznej średnicy rury przewodowej odpowiada jedna, dwie lub trzy średnice zewnętrzne osłony PE-HD oraz przypisane do nich minimalne grubości osłony.

Grubość izolacji zmienia się (rośnie) wraz ze średnicą zewnętrzną osłony (izolacja seria 1, seria 2 lub seria 3) oraz ze średnicą nominalną rury przewodowej. **Zwiększenie grubości warstwy izolacji polepsza właściwości izolacyjne rur preizolowanych.** Grubsza warstwa pianki stawia większy opór cieplny oraz wydłuża drogę dyfuzji gazów.

W przypadku osłony PE-HD, która również stanowi barierę dla przenikania gazów, zwiększenie grubości płaszcza nie w każdym przypadku polepsza właściwości izolacyjne rur preizolowanych. Podczas wytłaczania rur z polietylenu kalibracja wymiaru zewnętrznego jest wartością stałą dla danej średnicy. Pogrubienie osłony, ograniczające wymianę gazową i spowolnienie starzenia się izolacji, odbywa się kosztem grubości izolacji. W takim przypadku wpływ zwiększenia grubości osłony na wartość współczynnika przewodzenia ciepła po strzeżeniu jest nieznaczny (Kręcielewska & Iwko, 2022).

Bardzo skuteczną metodą okazało się natomiast wprowadzenie tzw. *bariery dyfuzyjnej*, czyli cienkiej warstwy materiału o bardzo małej przepuszczalności gazów, umieszczonej na powierzchni lub wewnątrz struktury rury osłonowej. Przykładem takiego materiału jest EVOH, czyli kopolimer etylenu i alkoholu winylowego, powszechnie stosowany w branży opakowaniowej (dla przemysłu spożywczego, kosmetycznego itp.) w celu poprawienia barierowości dla tlenu.

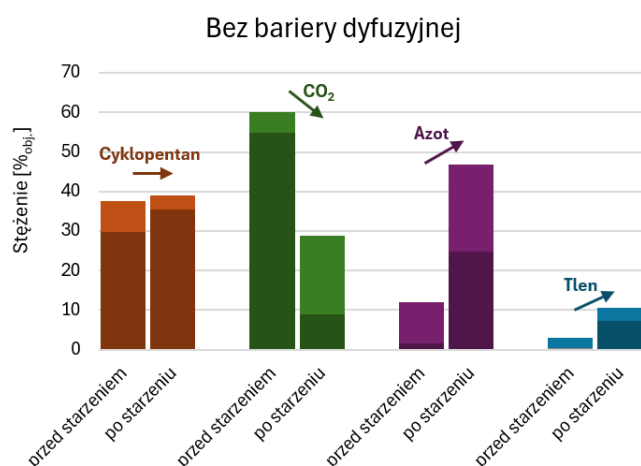
Cienka warstwa EVOH jest wbudowana w ściankę rury osłonowej w trakcie jej wytłaczania. Jest to konieczne z dwóch względów:

1. EVOH jest nieodporny na wilgoć – absorbuje wodę, a dodatkowo w wilgotnym środowisku pogarszają się jego właściwości barierowe. Podwyższenie wilgotności powyżej 60% skutkuje gwałtownym wzrostem przenikalności tlenu (Mokwena & Tang, 2012).),
2. EVOH umieszczony na wewnętrznej powierzchni rury PE-HD łatwo ulega mechanicznemu uszkodzeniu podczas produkcji rur.

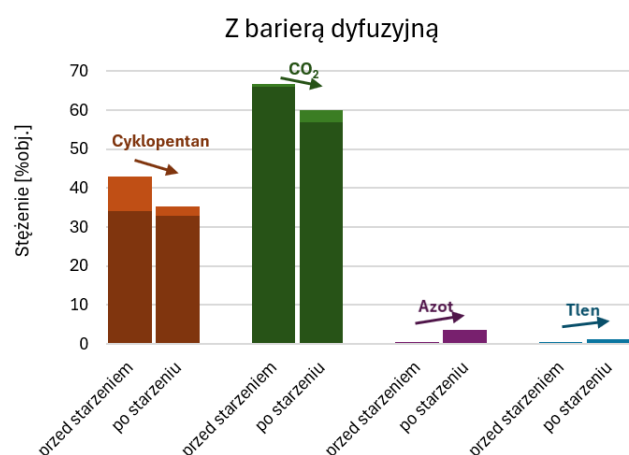
¹ ciśnienie cząstkowe, ciśnienie parcjalne – ciśnienie, jakie wywierałby dany składnik mieszaniny gazów, gdyby w tej samej temperaturze sam zajmował objętość całej mieszaniny

Tabela 3. Porównanie szybkości przenikania gazów (GTR) przez PE-HD i EVOH 32

Materiał	Warunki pomiarów		Szybkość przenikania gazu (GTR), cm ³ μm/(m ² dzień atm.)		
	Temperatura	Wilgotność względna	N ₂	O ₂	CO ₂
PE-HD	20°C, b.d. ⁽¹⁾		18 000	72 000	280 000
	23°C, 50% ⁽²⁾		21 000	40 000– 91 000	b.d.
EVOH 32	20°C, 0% ⁽²⁾		1,2	7	b.d.
	25°C, 0% ⁽³⁾		0,3	5	16

Oznaczenia źródeł: ⁽¹⁾ (PES.TEC. (2004).), ⁽²⁾ (Maes i in., 2020), ⁽³⁾ (Maes i in., 2017)

Rysunek 1. Stężenie objętościowe gazów w piance PUR przed i po starzeniu dla rur bez bariery dyfuzyjnej (Kręcielewska & Iwko, 2022). Kolor ciemny oznacza wartości minimalne, a jasny maksymalne



Rysunek 2. Stężenie objętościowe gazów w piance PUR przed i po starzeniu dla rur z barierą dyfuzyjną (Kręcielewska & Iwko, 2022). Kolor ciemny oznacza wartości minimalne, a jasny maksymalne

Tabela 4. Porównanie współczynników przewodzenia ciepła izolacji PUR λ₅₀ rur preizolowanych (dane z firmy Radpol Pipes)

Rura preizolowana DN50/125	Współczynnik przewodzenia ciepła izolacji PUR λ ₅₀ , W/mK		Zmiana, %
	Przed starzeniem	Po sztucznym starzeniu	
Bez bariery	0,0262	0,0298	13,7
Z barierą	0,0265	0,0268	1,1

Przenikanie gazu przez przegrodę składa się z kilku etapów:

- dyfuzji gazu w kierunku ścianki,
- rozpuszczania w materiale bariery,
- dyfuzji przez warstwę stałą,
- desorpcji po drugiej stronie bariery
- dyfuzji do zewnętrznej fazy gazowej.

Szybkość przenikania gazu (GTR – Gas Transmission Rate) jest zależna od dwóch głównych składników: efektywnego współczynnika dyfuzji w materiale przegrody oraz rozpuszczalności danego gazu w polimerze.

Całkowita objętość gazu przenikającego przez przegrodę jest proporcjonalna do wartości GTR, czasu, powierzchni przegrody i różnicy ciśnień, a odwrotnie proporcjonalna do grubości przegrody.

Aby wykazać barierowość warstwy EVOH, w Tabeli 3 zestawiono dane dotyczące szybkości przenikania gazów przez PE-HD i EVOH.

Dane wskazują, że szybkość przenikania gazów dla EVOH jest kilkanaście tysięcy razy mniejsza niż dla PE-HD. **Oznacza to, że membrana EVOH o grubości 1 mm stawia taki sam opór dla transportu gazów jak warstwa PE-HD o grubości kilkunastu metrów.**

Skuteczność zastosowania bariery dyfuzyjnej, w aspekcie ograniczenia wymiany gazowej podczas eksploatacji rur preizolowanych produkowanych metoda tradycyjną, potwierdzono w badaniach laboratoryjnych kilku systemów rurowych (Kręcielewska & Iwko, 2022). Na podstawie tych badań, na Rysunkach 1 i 2 zestawiono stężenia gazów w komórkach pianki nowej i sztucznie starzonej dla dwóch typów rur preizolowanych – bez i z warstwą antydyfuzyjną.

Wahania stężenia cyklopentanu były niewielkie, co związane jest z uzupełnianiem tego gazu z jego płynnego zapasu w komórkach. Podczas starzenia koncentracja CO₂ maleje, a azotu i tlenu rośnie, przy czym w przypadku braku bariery dyfuzyjnej zmiany te są znaczące. Również całkowite ciśnienie gazu w komórkach podczas starzenia znacznie obniżyło się dla układów bez bariery, z poziomu 110–124 kPa do 73–92 kPa, natomiast w przypadku zastosowania bariery spadek był niewielki, od poziomu 113–119 kPa do 104–117 kPa (Kręcielewska & Iwko, 2022).

Jak widać, zastosowanie bariery dyfuzyjnej skutecznie zabezpiecza izolację przed zmianą składu gazu w komórkach i spadkiem ciśnienia. W szczególności ogranicza utratę CO₂ z komórek pianki oraz przenikanie tlenu i azotu do wnętrza komórek, co ma wpływ na wartość współczynnika przewodzenia ciepła przez piankę w trakcie eksploatacji.

Wpływ zastosowania bariery dyfuzyjnej na współczynnik przewodzenia ciepła izolacji

Korzystny wpływ bariery dyfuzyjnej znajduje potwierdzenie w pomiarach współczynników przewodzenia ciepła izolacji PUR λ₅₀. Według źródeł literaturowych, podczas sztucznego starzenia standardowej rury DN50/125 współczynnik ten dla rur bez bariery wzrasta w zakresie od 4,3–14,4% (Kręcielewska, 2022; Kręcielewska & Menard, 2014), podczas gdy dla rur z barierą dyfuzyjną 0,36–4,23% (Kręcielewska & Iwko, 2022). Również po-

miary współczynnika λ_{50} wykonane dla rur produkowanych przez firmę Radpol Pipes wykazały wartości mieszczące się w powyższych granicach (Tabela 4).

Systemy ciepłownicze są projektowane na 30 lat eksploatacji, stąd wzrost współczynnika przewodzenia ciepła w czasie odgrywa istotną rolę w stratach ciepła. Współczynniki λ_{50} są mierzone przez laboratoria wg normy EN 253 (PN, 2024), przy czym sztuczne starzenie odbywa się poprzez wygrzewanie zespołu rurowego w temperaturze 90°C przez 150 dni. Stwierdzono jednak, że sztuczne warunki starzenia nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistego procesu degradacji izolacji (Kręcielewska, 2022; Kręcielewska & Menard, 2014). Dla rur DN50/125 z izolacją spienianą cyklopentanem wzrost współczynnika przewodzenia ciepła po naturalnym starzeniu jest ponad dwukrotnie wyższy niż po starzeniu sztucznym (Kręcielewska, 2022). Badania próbek rurociągów eksploatowanych od 4 do 14 lat wykazały także, że współczynnik λ_{50} wzrasta najszybciej w pierwszym okresie, do 4 lat.

Opracowano model zmian współczynnika przewodzenia ciepła podczas starzenia, uwzględniający rzeczywiste pogorszenie właściwości izolacyjnych pianki w trakcie 30-letniej eksploatacji zespołów rurowych (Kręcielewska i in., 2024). Umożliwia on szacowanie strat ciepła w kolejnych latach użytkowania instalacji ciepłowniczych. Według tego modelu, dla rur bez bariery dyfuzyjnej iloraz (λ_{50} po 30 latach eksploatacji/ λ_{50} nowej izolacji) w zależności od średnicy rurociągu zmienia się od 9% dla DN450 do aż 35% dla DN20. W przypadku zastosowania bariery przyjęto, że wzrost λ_{50} jest stały, niezależnie od średnicy rurociągu, i po 30 latach wynosi 4%.

Bilans strat ciepła w przykładowej sieci ciepłowniczej

Przedstawiono bilans strat ciepła podczas eksploatacji przykładowej miejskiej sieci ciepłowniczej. Obliczenia

przeprowadzone przez firmę Radpol Pipes bazują na normie PN-EN 13941-1 (PN, 2022) oraz modelu (Kręcielewska i in., 2024) zmian współczynnika przewodzenia ciepła. Kalkulacje przeprowadzono dla dwóch wariantów, dla rur preizolowanych bez bariery i z barierą dyfuzyjną. W drugim wariancie przyjęto, że bariera występuje nie tylko w prostych odcinkach rur, ale także we wszystkich kształtkach i połączeniach mufowych. Straty ciepła wyznaczono dla kolejnych okresów jednorocznych, przyjmując zmiany wartości współczynników λ_{50} w oparciu o tabelę 6 z publikacji (Kręcielewska i in., 2024).

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- czas użytkowania sieci 30 lat,
- system pojedynczych rur preizolowanych ułożonych bezpośrednio w gruncie,
- całkowita długość odcinka s.c. 973 m. Długości poszczególnych odcinków rurociągów, na które składają się proste odcinki rur oraz kształtki podano w Tabeli 5. Wartości odnoszą się do długości sieci, natomiast całkowita długość rurociągów jest dwukrotnie większa, gdyż obejmuje przewody zasilające i powrotne,
- izolacja seria 1 na rurociągach zasilających i powrotnych,
- przykrycie rurociągu $H = 1$ m,
- temperatura gruntu $T_s = 8^\circ\text{C}$,
- temperatura nośnika ciepła w sezonie grzewczym $T = 78,5/42^\circ\text{C}$ (zasilanie/powrót),
- temperatura nośnika ciepła poza sezonem grzewczym $T = 70/40^\circ\text{C}$ (zasilanie/powrót),
- współczynnik przewodzenia ciepła gruntu $\lambda_c = 1,6$ W/mK,
- współczynnik przewodzenia ciepła nowej pianki poliuretanowej dla rur bez osłony i z osłoną antydyfuzyjną $\lambda_{50} = 0,0262$ W/mK,
- liczba dni sezonu grzewczego 220, poza sezonem grzewczym 145.

Dodatkowo obliczono koszt straconej energii cieplnej

Tabela 5. Straty ciepła obliczone przez firmę Radpol Pipes dla przykładowej sieci ciepłowniczej

Średnica nominalna rury przewodowej /średnica osłony	Długość odcinka sieci m	Straty ciepła			
		Bez bariery A	Z barierą B	Różnica A-B	Zmiana 100 * (A-B)/A
		GJ	GJ	GJ	%
DN32/110 mm	105	2022	1732	290	14,34%
DN40/110 mm	233	5206	4432	774	14,87%
DN50/125 mm	142	3498	3012	486	13,89%
DN65/140 mm	95	2739	2371	368	13,44%
DN80/160 mm	69	2007	1763	244	12,16%
DN100/200 mm	200	5975	5371	604	10,11%
DN125/225 mm	129	4452	4025	427	9,59%
Suma	973	25899	22706	3193	≈ 12,3%
Koszt ciepła straconego, tys. zł		3496	3065	431	12,3
Emisja CO₂, tona	węgiel kamienny	2460	2157	303	12,3
	węgiel brunatny	2849	2498	351	12,3
	gaz ziemny	1450	1272	179	12,3
	olej opałowy	1994	1748	246	12,3

Tabela 6. Struktura produkcji systemów rurowych preizolowanych firmy Radpol Pipes

Element	Udział, %
Rury	85,62
Łuki	11,01
Odgałęzienia	1,95
Zawory	0,98
Zwężki	0,22
Odwodnienia i odpowietrzenia	0,11
Punkty stałe	0,05
Kompensatory	0,05
Inne	0,01

w oparciu o stałą średnią cenę 134,97 zł/GJ (SPEC, 2025). oraz emisję CO₂ odpowiadającą utraconej energii, dla kilku rodzajów paliw stosowanych w ciepłowniach (KOBIZE, 2024):

- węgiel kamienny 94,99 kgCO₂/GJ,
- węgiel brunatny 110,81 kgCO₂/GJ,
- gaz ziemny 55,73 kgCO₂/GJ,
- olej opałowy 76,86 kgCO₂/GJ.

Zestawienie wyników kalkulacji strat ciepła oraz efektów ekonomicznych i środowiskowych przedstawiono w Tabeli 5.

Dla założonej struktury sieci ciepłowniczej, wyniki obliczeń wskazują, że:

- zastosowanie bariery dyfuzyjnej ogranicza straty ciepła o ponad 12%,
- dla przyjętej, stałej ceny jednostki ciepła, oszczędność

w skali 30 lat wyniesie 431 tys. zł, przy czym cena ciepła ma tendencję rosnącą i w rzeczywistości przewidywana jest wyższa wartość,

- emisja CO₂ spadnie w tym okresie w granicach (179–351) ton, w zależności od stosowanego paliwa. Dodatkowo, w przypadku stosowania paliw kopalnych, ograniczona zostanie także emisja szkodliwych substancji do atmosfery, głównie: pyłów, dwutlenku siarki oraz tlenków azotu.

Powyższe wskaźniki uzyskano przy założeniu, że bariera jest zastosowana we wszystkich elementach instalacji ciepłowniczej. W przyjętej do obliczeń strukturze sieci, średni udział długości prostych odcinków rur wyniósł ok. 77%. Resztę stanowiły różnego typu kształtki, które stanowią istotny element sieci ciepłowniczej. Przykładowo, struktura produkcji systemów preizolowanych firmy Radpol Pipes jest zestawiona w Tabeli 6. Jak widać, przeciętnie 15% długości sieci stanowią produkty inne niż proste rury, dlatego ważna jest aplikacja bariery dyfuzyjnej także w tych elementach.

Pozostawienie przerw w barierze dyfuzyjnej skutkuje powstaniem gradientów stężeń gazów w kierunku osiowym i pojawieniem się dyfuzji pomiędzy odcinkami rur posiadającymi barierę i elementami jej pozbawionymi. W celu znaczącego ograniczenia strat ciepła całej sieci ciepłowniczej, istotne jest umieszczenie bariery nie tylko we wszystkich elementach instalacji, a także w połączeniach mufowych pomiędzy poszczególnymi częściami rurociągów. Brak bariery dyfuzyjnej w kształtkach i złączach mufowych prowadzi do zmniejszenia efektu oszczędności o kilkanaście procent.

Tabela 7. Porównanie systemów rur preizolowanych bez i z barierą dyfuzyjną

Cechy	Bez bariery	Z barierą
Płaszcz osłonowy	jednowarstwowy PEHD	wielowarstwowy PEHD/EVOH/PEHD
Izolacja – nowa pianka PUR	– skład chemiczny i struktura nowej pianki takie same, – komórki wypełnione głównie CO₂ i cyklopentanem, z niewielką zawartością tlenu i azotu, – taki sam początkowy współczynnik przewodzenia ciepła λ_{50}.	
Starzenie pianki PUR podczas eksploatacji	– stopniowa wymiana gazowa – zastępowanie CO₂ przez tlen i azot, – stopniowe pogarszanie właściwości termoizolacyjnych pianki, zwłaszcza w pierwszych latach eksploatacji, – wzrost współczynnika przewodzenia ciepła λ_{50}, – degradacja struktury pianki na skutek oksydacji, – pogorszenie właściwości mechanicznych pianki i integralności systemu zespolonego na skutek oksydacji i działania wysokiej temperatury.	– bardzo ograniczona wymiana gazowa, – utrzymanie właściwości termoizolacyjnych pianki na niewiele zmienionym poziomie przez pełen okres eksploatacji, – niewielki wzrost współczynnika przewodzenia ciepła λ_{50}, – spowolniona degradacja struktury pianki na skutek oksydacji, – nieznaczne osłabienie właściwości mechanicznych pianki i integralności systemu zespolonego, głównie na skutek działania wysokiej temperatury.
Straty ciepła w sieci ciepłowniczej	– wzrost strumienia ciepła traconego w kolejnych latach eksploatacji, – większe straty w przypadku rur o mniejszych średnicach, – sumaryczne straty ciepła po 30letniej eksploatacji wyższe od systemów z barierą dyfuzyjną.	– znacznie wolniejszy wzrost strumienia ciepła traconego w kolejnych latach eksploatacji, – niewielka zależność od średnic rur, – sumaryczne straty ciepła po 30letniej eksploatacji niższe od systemów bez bariery dyfuzyjnej.
Koszty strat ciepła	– wysokie koszty ekonomiczne ciepła traconego, – wysokie koszty środowiskowe – większa emisja CO₂ i innych zanieczyszczeń.	– niższe koszty ekonomiczne ciepła traconego, – niższe koszty środowiskowe – mniejsza emisja CO₂ i innych zanieczyszczeń.

Wnioski

Obserwowany na przestrzeni ostatnich lat ciągły wzrost kosztów wytwarzania ciepła wskazuje, że konieczne jest wdrażanie rozwiązań ograniczających straty ciepła podczas jego przesyłania w systemach sieci ciepłowniczych. Skuteczną metodą w tym obszarze jest stosowanie systemów rur preizolowanych z barierą dyfuzyjną.

Bariera dyfuzyjna przyczynia się do ograniczenia migracji poroforów z pianki izolacyjnej, jak i wnikania tlenu oraz azotu do komórek izolacji. Istotne jest stosowanie warstwy antydyfuzyjnej we wszystkich elementach systemu przesyłania ciepła, zarówno odcinkach prostych jak i wszelkich kształtkach, a także złączach mufowych. Powoduje to zachowanie właściwości termoizolacyjnych pianki na prawie niezmienionym poziomie przez cały okres eksploatacji systemu. Skutkiem są zmniejszone straty ciepła i wynikające z tego niższe koszty ekonomiczne i środowiskowe. Porównanie systemów rur preizolowanych z płaszczem osłonowym bez i z barierą dyfuzyjną EVOH przedstawiono w Tabeli 7.

Bibliografia

- URE. (2023) <https://www.ure.gov.pl/pl/cieplo/charakterystyka-ryнку/12447.2023.html> (Dostęp: 24.03.2025)
- Kręcielewska, E. (2021). Fakty i mity dotyczące rur preizolowanych stosowanych w ciepłownictwie – Część I. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 52(12), 19–27. <https://doi.org/10.15199/9.2021.12.3>
- Bretsznajder, S. (1962). Własności gazów i cieczy, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne
- Hobler, T. (1986). Ruch ciepła i wymienniki, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne
- Santiago-Calvo, M., Tirado-Mediavilla, J., Ruiz-Herrero, J. L., Villafañe, F., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2019). Long-term thermal conductivity of cyclopentane-water blown rigid polyurethane foams reinforced with different types of fillers. *Polymer International*, 68(10), 1826–1835. <https://doi.org/10.1002/pi.5893>
- Marrucho, I. M., Oliveira, N. S., & Dohrn, R. (2003). Vapor-phase thermal conductivity of binary mixtures of cyclopentane and R134a with R365mfc. *Journal of cellular plastics*, 39(2), 133–153. <https://doi.org/10.1177/0021955X03039002004>
- Vassiliou, C., Assael, M. J., Huber, M. L., & Perkins, R. A. (2015). Reference correlations of the thermal conductivity of Cyclopentane, iso-Pentane, and n-Pentane. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 44(3). <https://doi.org/10.1063/1.4927095>
- Olsson, M. E., Jarfelt, U., Fröling, M., Mangs, S., & Ramnäs, O. (2002). Diffusion of cyclopentane in polyurethane foam at different temperatures and implications for district heating pipes. *Journal of cellular plastics*, 38(2), 177–188.
- Kręcielewska, E. (2022). Fakty i mity dotyczące rur preizolowanych stosowanych w ciepłownictwie – Część II. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.15199/9.2022.1.2>
- PKN. (2024). PN-EN 253+A1:2024-06. Sieci ciepłownicze — System pojedynczych rur zespolonych do wodnych sieci ciepłowniczych układanych bezpośrednio w gruncie — Fabrycznie wykonany zespół rurowy ze stalowej rury przewodowej, izolacji cieplnej z poliuretanu i osłony z polietylenu. Polski Komitet Normalizacyjny
- Kręcielewska, E., & Iwko, I. (2022). Wpływ grubości osłony PE-HD i bariery dyfuzyjnej na przewodność cieplną, jednostkowe straty ciepła oraz skład gazów w izolacji PUR w rurach preizolowanych produkowanych metodą tradycyjną. Instal.
- Mokwena, K. K., & Tang, J. (2012). Ethylene Vinyl Alcohol: A Review of Barrier Properties for Packaging Shelf Stable Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(7), 640–650. <https://doi.org/10.1080/010408398.2010.504903>
- PES.TEC. (2004). Gas permeability of HDPE pipes (TI 610-3, Edition 0104).
- Maes, C., Molder, M. T., Luyten, W., Herremans, G., Wincelmans, N., Peeters, R., Carleer, R., & Buntinx, M. (2020). Determination of the nitrogen gas transmission rate (N2GTR) of ethylene vinyl alcohol copolymer, using a newly developed permeation measurement system. *Polymer Testing*, 93, 106979. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106979>
- Maes, C., Luyten, W., Herremans, G., Peeters, R., Carleer, R., & Buntinx, M. (2017). Recent updates on the barrier properties of Ethylene Vinyl Alcohol copolymer (EVOH): a review. *Polymer Reviews*, 58(2), 209–246. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1394323>
- Kręcielewska, E., & Menard, D. (2014). Współczynnik przewodzenia ciepła izolacji w rurach preizolowanych po naturalnym i sztucznym starzeniu. Instal.
- Kręcielewska, E., Starobrat, A., & Iwko, I. (2024). Sposoby obliczania strat ciepła wg PN-EN 13941-1 w systemach rur preizolowanych pojedynczych i podwójnych. Część 1: Metodyka i założenia. *Czasopismo Instal.*, (9), 14–23.
- PKN. (2022). PN-EN 13941-1+A1:2022-05. Sieci ciepłownicze — Projektowanie i montaż systemu izolowanych termicznie zespołów rur pojedynczych i podwójnych do sieci wody gorącej układanych bezpośrednio w gruncie — Część 1: Projektowanie. Polski Komitet Normalizacyjny
- SPEC (2025). <https://www.spec-pec.pl/ceny-ciepła-z-wyrowaniem> (Dostęp: 24.03.2025)
- KOBIZE. (2024). Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2022 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2025, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy