



---

---

## Wykorzystanie metody minimalizacji generowania entropii w optymalizacji jednokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych

Paweł Duda<sup>a\*</sup>

REKOMENDOWANE PRZEZ: *prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Politechnika Wroclawska

\* Adres do korespondencji: : pawel.duda@pwr.edu.pl, tel. (71) 320 39 83

---

### STRESZCZENIE

Publikacja prezentuje sposoby transportu najczęściej spotykanych skroplonych gazów takich, jak: azot, tlen, argon i gaz ziemny. Wskazuje na korzyści wynikające z wykorzystania rurociągów kriogenicznych jako wygodnego i ekonomicznego sposobu transportu gazów w postaci ciekłej. W treści opisano budowę poszczególnych podzespołów jednokanałowych rurociągów kriogenicznych. Wymieniono również stosowane materiały konstrukcyjne. Przedstawiono metodę minimalizacji generowania entropii jako sposób optymalizacji jednokanałowych rurociągów kriogenicznych. Uzyskane wyniki przedstawiono na przykładzie rurociągów transportujących trzy wybrane, wysokowrzące czynniki kriogeniczne.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *kriogenika, rurociąg, entropia, optymalizacja*

---

### 1. WPROWADZENIE

Wzrost gospodarczy jest ściśle skorelowany z konsumpcją gazów technicznych, tj. tlenu, azotu, argonu oraz gazu ziemnego. Z danych dotyczących USA wynika, że zużycie gazów technicznych rośnie około dwukrotnie szybciej od wzrostu produktu narodowego brutto PKB. Również wzrost konsumpcji gazu ziemnego, w tym w postaci skroplonej (LNG), podlega podobnemu uwarunkowaniu [1]. I tak począwszy od 1990 roku globalne obroty LNG sukcesywnie rosły od około 80 milionów metrów sześciennych w 1990 roku do 250 milionów m<sup>3</sup> w 2010 roku. Prognoza względnego wzrostu konsumpcji LNG w latach 2013–2020 wynosi 7,5% na rok. Gazy techniczne stosowane są praktycznie w każdej dziedzinie przemysłu i budownictwie. W szczególności obecne tendencje rozwoju energetyki mogą spowodować wręcz skokowy wzrost popytu na tlen, co wynika z możliwości ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> przez wdrożenie technologii spalania tlenowego [2]. Natomiast gaz ziemny jest uważany za

paliwo niskoemisyjne. Skroplenie gazu ziemnego umożliwia zwiększenie gęstości jego energii do wartości porównywalnej z konwencjonalnymi paliwami ciekłymi i ułatwia transport tego czynnika poza systemem gazociągów, w tym transoceaniczny. Obecnie w coraz większym stopniu zbiorniki i rurociągi służące do przesyłu LNG są izolowane próżniowo i wykorzystują technologie rozwinięte na potrzeby systemów i instalacji wykorzystujących ciekły azot (78 K), a nawet hel (4,2 K).

Wybrane parametry skroplonych azotu, tlenu i LNG (metanu) podano w tabeli 1. Zasadność stosowania transportu gazów w postaci ciekłej dobrze obrazuje stosunek gęstości  $\rho_1/\rho_3$  ilustrujący redukcję objętości uzyskaną dzięki skropleniu. Transport gazów w postaci ciekłej realizowany jest obecnie w izolowanych zbiornikach i rurociągami kriogenicznymi.

Tab. 1: Właściwości skroplonych azotu, tlenu i LNG (metanu) [3]

	$T_N$ K	$\rho_1$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_2$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_3$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_1/\rho_3$ -	$p_c$ MPa	$T_c$ K	$R$ kJ/kg
N <sub>2</sub>	77,3	808	4,62	1,25	646,4	3,39	132,6	199,0
Ar	87,3	1395	5,77	1,79	779,3	4,9	150,9	163,0
O <sub>2</sub>	90,2	1140	4,47	1,43	797,2	5,04	154,6	213,0
LNG	111,6	423	1,82	0,717	590,0	4,60	190,5	510,0

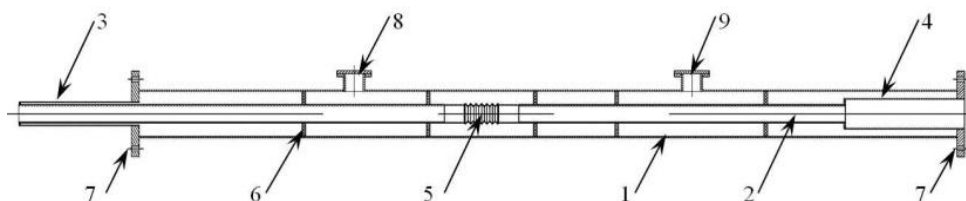
$T_N$  – temperatura wrzenia dla  $p = 1$  ata,  $\rho$  – gęstość,  $p_c$  – ciśnienie krytyczne,  $T_c$  – temperatura krytyczna, indeksy: 1 – ciecz w  $T_N$ , 2 – gaz w  $T_N$ , 3 – gaz przy 1 ata i 0 °C,  $R$  – ciepło parowania dla  $p = 1$  ata.

Zastosowanie rurociągów kriogenicznych do transportu LNG uzasadnione jest w przypadkach charakteryzujących się stałym w czasie i przewidywalnym zapotrzebowaniem na gaz ziemny oraz nieprzekraczającą kilkudziesięciu kilometrów odległością pomiędzy dystrybutorem a konsumentem [4]. Linie kriogeniczne najczęściej wykorzystywane są do transportu LNG z miejsca wydobycia i skraplania do zbiorników magazynowych oraz wszędzie tam, gdzie przelewany jest ciekły gaz. Transport LNG odbywa się w rurociągach jednokanałowych, taki sam typ linii kriogenicznych wykorzystywany jest w przypadku przesyłu skroplonego azotu, tlenu i argonu. Konstrukcje rurociągów kriogenicznych są obecnie intensywnie rozwijane i optymalizowane, np. przez zastosowanie elastycznych, karbowanych przewodów zamiast sztywnych rur, co ogranicza problemy związane ze skurczem termicznym.

## 2. JEDNOKANAŁOWE RUROCIĄGI KRIOGENICZNE

Do przesyłu ciekłych gazów takich, jak: azot, argon, tlen i LNG wykorzystuje się jednokanałowe linie kriogeniczne. Podstawowe elementy konstrukcyjne występujące w jednokanałowych rurociągach kriogenicznych zostały schematycznie pokazane na rysunku 1. Rurociągi kriogeniczne charakteryzują się budową modułarną. Podstawowym elementem modułu jednokanałowej linii kriogenicznej jest rura procesowa (2), w której przepływa transportowany czynnik. Ponieważ podczas wychładzania rura procesowa ulega skurczowi termicznemu, w celu ograniczenia wzrostu naprężeń konieczne jest stosowanie kompensatorów (5) w postaci elastycznych mieszków. Podpory przesuwne (6) mają za zadanie ograniczenie ugięcia rury procesowej do dopusz-

czalnej wartości oraz zapewnienie odpowiednich warunków pracy dla mieszka kompensacyjnego.



Rys. 1: Schemat modułu jednokanałowej kriogenicznej linii przesyłowej: 1 – płaszcz próżniowy, 2 – rura procesowa, 3 – złącze bagnetowe męskie, 4 – złącze bagnetowe żeńskie, 5 – kompensator osiowy, 6 – podpora przesuwna, 7 – kołnierz, 8 – zawór próżniowy, 9 – zawór bezpieczeństwa

Obecnie w celu łączenia modułów coraz częściej stosuje się złącza bagnetowe – rys. 1, poz. (3, 4, 7). Dzięki odpowiedniemu doborowi kształtu złącza i materiałów uszczelniających można uzyskać dobrą szczelność połączenia, które nie wymaga spawania i pompowania próżni. Połączenie śrubowe złącza bagnetowego męskiego z żeńskim spełnia również funkcję stałej podpory stabilizującej rurę procesową (2) względem płaszcza próżniowego (1). Płaszcz próżniowy jest wyposażony w zawór próżniowy (8) umożliwiający uzyskanie próżni izolacyjnej. Dodatkowy zawór bezpieczeństwa (9) chroni płaszcz próżniowy przed nadmiernym wzrostem ciśnienia w przypadku uszkodzenia i utraty szczelności rury procesowej, a następnie wypełnienia przestrzeni izolacyjnej czynnikiem kriogenicznym silnie zwiększającym swoją objętość pod wpływem dopływów ciepła z otoczenia (por. tab. 1).

Konstrukcja linii kriogenicznej umożliwia bardzo silne ograniczenia dopływów ciepła przez przewodzenie oraz, dzięki zastosowaniu izolacji próżniowej, praktycznie wyeliminowanie konwekcji w przestrzeni pomiędzy płaszczem próżniowym i rurą procesową. Ze względu na dużą różnicę temperatury obu elementów w rurociągach kriogenicznych zachodzić może intensywne wymiana ciepła przez promieniowanie, dlatego konieczne jest jej ograniczenie. Jest to możliwe przez zastosowanie tzw. wielowarstwowej izolacji próżniowej.

Optymalizacja konstrukcji rurociągów kriogenicznych wymaga przewyciężenia sprzeczności termodynamicznej. Zwiększenie średnicy rurociągu powoduje wzrost dopływów ciepła do przepływającego w rurze procesowej czynnika, natomiast podczas redukcji średnicy obserwuje się dławienie czynnika, mogące prowadzić do jego częściowego odparowania. Optymalizacja średnicy rury procesowej rurociągu może być przeprowadzona z wykorzystaniem, wynikającej z II zasady termodynamiki, metody minimalizacji wzrostu entropii tożsamej z metodami minimalizacji degradacji egzergii [6, 7]. W literaturze znane są przykłady wykorzystania metody minimalizacji wzrostu entropii w optymalizacji takich procesów, jak np.: wymiana ciepła w przypadku mikroprzepływów [8], rury pulsacyjne [9] czy agregaty adsorpcyjne [10].

### 3. METODA MINIMALIZACJI WZROSTU ENTROPII W ZASTOSOWANIU DO OPTYMALIZACJI RUROCIĄGÓW KRIOGENICZNYCH

Koszt transportu ciekłego gazu w rurociągu związany jest z koniecznością wytworzenia różnicy ciśnień, umożliwia pokonanie oporów przepływu, oraz z dopływami ciepła, które powodują odparowanie cieczy kriogenicznej. Dlatego należy dążyć do redukcji oporów przepływu oraz obniżyć dopływy ciepła do transportowanego czynnika, pamiętając jednocześnie o zachowaniu stabilności mechanicznej i odpowiedniej wytrzymałości. Ponieważ zmniejszenie dopływów ciepła osiągane jest przez ograniczenie pola powierzchni, do której dopływa ciepło, czyli redukcję średnicy rury procesowej, działanie to powoduje wzrost oporów przepływu. Dodatkowo ograniczenie dopływów ciepła osiągnąć można, minimalizując liczbę podpór, które stanowią połączenie cieplne między zimną rurą procesową a płaszczem próżniowym. Zmniejszenie liczby podpór ma jednak wpływ na stabilność mechaniczną całej linii, dlatego aby dokonać kompleksowej optymalizacji rurociągu kriogenicznego, należy znaleźć parametr, który powiąże wszystkie opisane zmienne i umożliwi określenie najbardziej korzystnego ich zestawienia. W tym celu wykorzystano metodę polegającą na minimalizacji strumieni entropii generowanych w rurociągu. Z II zasady termodynamiki wynika, że podczas każdego nieodwracalnego procesu suma entropii układu i otoczenia wzrasta. Zgodnie z prawem Gouya–Stodoli, przyrost entropii powoduje konieczność wykonania dodatkowej pracy  $W_D$ :

$$W_D = T_O \cdot \Delta S, \quad (1)$$

$T_O$  – temperatura otoczenia K,  $\Delta S$  – przyrost entropii J/kg/K.

Jak wynika z równania (1), urządzenia cieplne powinny charakteryzować się możliwie małymi przyrostami entropii  $\Delta S$ . W rurociągach kriogenicznych zwiększenie entropii wynika z procesów dławienia czynnika podczas przepływu przez rurę procesową oraz wymiany ciepła między elementami charakteryzującymi się różną temperaturą. Podlegająca optymalizacji funkcja celu  $\dot{S}$ , będąca sumą strumieni entropii w trakcie przepływu czynnika przez rurociąg kriogeniczny, może być w sposób ogólny opisana jako:

$$\dot{S} = \sum_i \dot{S}_{\Delta T} + \sum_j \dot{S}_{\Delta P} \quad (2)$$

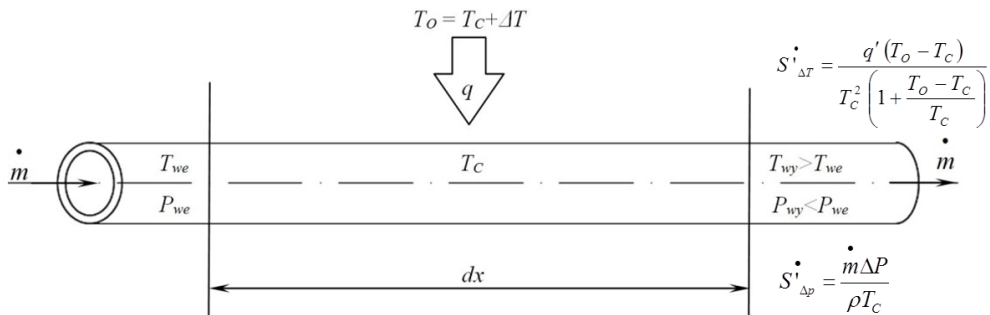
$\sum_i \dot{S}_{\Delta T}$  – suma strumieni entropii generowanych na skutek różnic temperatury,  $\sum_j \dot{S}_{\Delta P}$  – suma strumieni entropii generowanych na skutek spadków ciśnienia w rurociągu.

W jednokanałowym rurociągu kriogenicznym strumień entropii generowany na jednostkę długości rurociągu jest równy:

$$\dot{S}' = \dot{S}'_{\Delta T} + \dot{S}'_{\Delta P} \quad (3)$$

$\dot{S}'_{\Delta T}$  – strumień entropii generowany na skutek różnic temperatury przypadający na jednostkę długości rurociągu,  $\dot{S}'_{\Delta P}$  – strumień entropii generowany na skutek spadków

ciśnienia przypadający na jednostkę długości rurociągu. Procesy generowania entropii w rurociągu jednokanałowym w sposób uproszczony pokazano na rysunku 2.

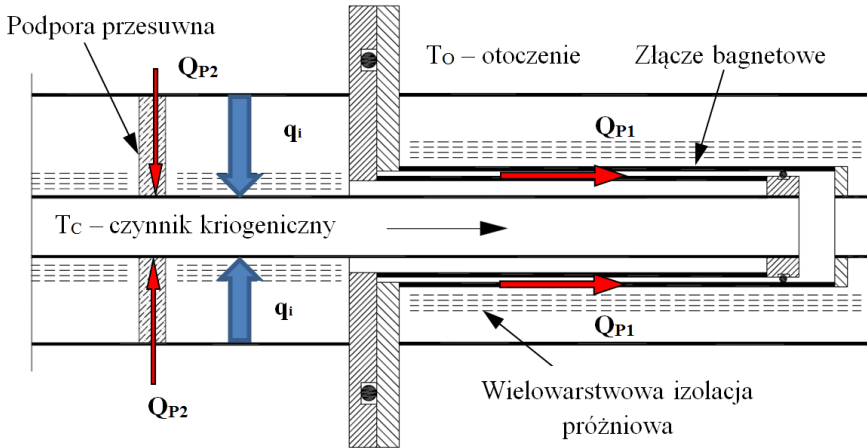


Rys. 2: Procesy wzrostu entropii w odcinku rurociągu długości  $dx$  [7]

Przyjmując za  $\Delta T = T_o - T_c$ , gdzie  $T_o$  – oznacza temperaturę otoczenia i  $T_c$  oznacza temperaturę czynnika kriogenicznego oraz uwzględniając długość rurociągu, równanie przedstawione na rysunku 2, które umożliwia wyznaczenie strumienia entropii generowanego na skutek dopływów ciepła na jednostkę długości rurociągu; przyjmując postać szczególną dla przesyłu cieczy kriogenicznych (4):

$$\dot{S}_{\Delta T} = \frac{Q(T_o - T_c)}{T_c^2 \left(1 + \frac{T_o - T_c}{T_c}\right)} \quad (4)$$

W celu określenia strumienia entropii generowanego na drodze dopływów ciepła do przesyłanego czynnika należy poznać wszystkie drogi, na których zachodzi wymiana ciepła między otoczeniem a czynnikiem kriogenicznym (rys. 3). W rurociągu kriogenicznym wyróżnić można powierzchniowe i miejscowe strumienie ciepła dopływającego do czynnika kriogenicznego. Sumaryczne strumienie powierzchniowe, uwzględniające zarówno przewodzenie ciepła przez gaz resztkowy, jak i promieniowanie w rurociągach zaizolowanych z wykorzystaniem wielowarstwowej izolacji próżniowej (tzw. superizolacji) określić można jako ciepło przenikające przez superizolację –  $q_i$ . Obecnie używanie wielowarstwowej izolacji próżniowej w technice kriogenicznej stało się standardem. Właściwości superizolacji zostały dobrze zbadane i opisane w literaturze [5], gdzie odnaleźć można równania umożliwiające wyznaczenie strumieni ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od jej rodzaju.



Rys. 3: Drogi dopływów ciepła w jednokanałowej linii kriogenicznej

Wybrane równania zaprezentowano w tabeli 2. Strumień ciepła dopływający do przesyłanego kriogenu dla określonego typu izolacji wielowarstwowej jest zależny od pola powierzchni rury procesowej, co za tym idzie może zostać on przedstawiony w funkcji średnicy tej rury.

Tab. 2: Wzory do szacowania wartości strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwowe izolacje próżniowe dla izolacji wykonanych z różnych materiałów [5]

Rodzaj izolacji	Przybliżenie empiryczne równania umożliwiającego oszacowanie wartości strumienia ciepła
DGM/DSN	$q = \frac{4.37 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{N}^{3.27} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{1.444 \cdot 10^{-14} (T_H^{4.51} - T_C^{4.51})}{N}$
DAM/DSN	$q = \frac{7.46 \cdot 10^{-12} \cdot \bar{N}^{3.56} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{3.19 \cdot 10^{-12} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{N}$
DAM/Tissueglas	$q = \frac{1.13 \cdot 10^{-13} \cdot \bar{N}^{3.91} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{4.727 \cdot 10^{-13} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{N}$
Pognieciony SAM	Dla $\bar{N} \leq 35$ warstw/cm $q = \frac{1.65 \cdot 10^{-9} \cdot \bar{N}^{2.32} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{5.97 \cdot 10^{-13} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{N}$

DGM (*double goldised Mylar*®) – podwójnie połączony Mylar®.

SAM (*single aluminized Mylar*®) – jednostronnie aluminizowany Mylar®.

DSN (*double silki net*) – podwójna siateczka jedwabna.

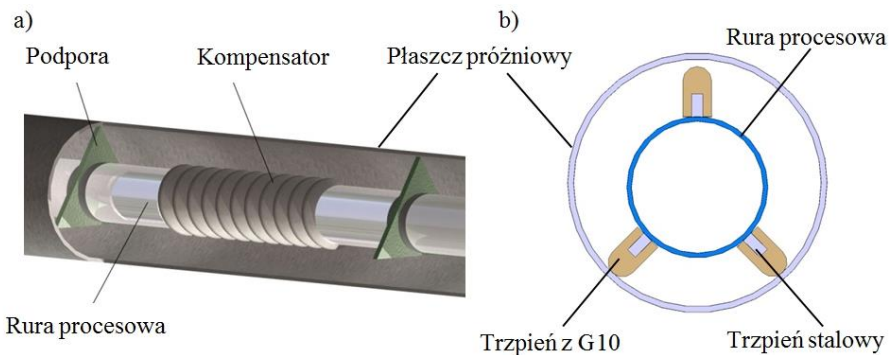
Tissueglas – przekładka w postaci maty ze sprasowanych włókien szklanych.

Strumień ciepła dopływający do czynnika kriogenicznego przez męską i żeńską część złącza bagnetowego ma charakter miejscowy i określić można go ogólnym równaniem (5). Ponieważ wszystkie rurociągi budowane są według określonego typoszeru rur, dla określonej średnicy nominalnej  $d$  kanału przepływowego wykonuje się złącza bagnetowe o określonym przekroju:

$$Q_{p1} = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{B(x)}} \left[ \int_{T_c}^{T_b} \lambda(T) dT \right], \quad (5)$$

$B$  – pole przekroju poprzecznego złącza bagnetowego (męskiego i żeńskiego),  
 $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału, z którego zostało wykonane złącze bagnetowe.

Dlatego słuszne jest twierdzenie, że  $B(x)=f(d)$ . Współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , występujący w równaniu (5), jest funkcją temperatury i zależy od materiału złącza. Rurociągi kriogeniczne wykonywane są ze stali austenitycznej odpornej na działanie niskich temperatur. Stali austenitycznej używa się również do wykonania złączy bagnetowych. Współczynniki przewodzenia ciepła dla materiałów stosowanych w kriogenice zostały dobrze zbadane i opisane w literaturze [3]. Strumień ciepła  $Q_{p2}$  zaznaczony na rysunku 3 przedstawia ciepło dopływające do przesyłanego czynnika kriogenicznego przez podpory ślizgowe. Służą one do zachowania odpowiedniego dystansu pomiędzy rurą procesową a płaszczem próżniowym oraz pełnią rolę stabilizującą mieszki kompensacyjne. Ilość ciepła przepływającego przez podpory zależy od sposobu ich wykonania oraz od liczby podpór w rurociągu. Na rysunku 4 przedstawiono dwa najczęściej stosowane sposoby wykonania podpór ślizgowych występujących w kriogenicznych rurociągach jednokanałowych.



Rys. 4: Rodzaje podpór ślizgowych wykorzystywanych w rurociągach jednokanałowych:  
 a) z wykorzystaniem płaskich płytek, b) z wykorzystaniem trzpień

Pierwszy typ podpory wykonuje się w postaci płaskiej płytki z włókien szklanych zalanych żywicą epoksydową – tzw. G10. Zaostrzenie końców podpory powoduje zmniejszenie pola kontaktu z rurą próżniową. Wymiary dobrane są w taki sposób, aby pomiędzy podporą a rurą próżniową wystąpił nieznaczny luz promieniowy, umożliwia on montaż podpory oraz sprawia, że podczas pracy podpora kontaktuje się z rurą próżniową tylko w 2 punktach. Drugi typ podpory wykonany jest z walcowych trzpień wykonanych z G10, trzpienie te nakręcane są na nagwintowane piny, które zostały zgrzane z rurą procesową. Ilość ciepła dopływająca przez pojedynczą podporę jest trudna do wyznaczenia w sposób analityczny, używając klasycznych równań opisujących przewodzenie ciepła, dlatego do wyznaczenia dopływów ciepła przez podpory

ślizgowe wykorzystano analizę termiczną opartą na metodzie elementów skończonych. Analizę termiczną przeprowadzono zarówno dla podpór wykonanych w postaci płaskiej płytki, jak i dla podpór wykonanych z trzpienia o kształcie walcowym. Uzyskane wyniki dla typowych średnic kanału przepływowego przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3: Dopływy ciepła przez pojedynczą podporę przesuwą w odniesieniu do średnicy kanału przepływowego

Średnica kanału przepływowego	Dopływy ciepła przez podporę wykonaną z płaskiej płytki	Dopływy ciepła przez podporę wykonaną z trzpieni
$d$ [mm]	$Q$ [W]	$Q$ [W]
21,3	0,233	0,693
26,9	0,242	0,788
33,7	0,254	0,876
42,4	0,263	0,887
48,3	0,280	1,01

Z tabeli 3 wyznaczyć można funkcję dopływów ciepła w odniesieniu do średnicy kanału, jednak sumaryczna ilość ciepła, jaka przekazywana jest przez podpory przesuwne w konkretnym rurociągu, zależy od liczby wykorzystanych podpór. Liczba podpór niezbędnych w danym rurociągu wyznacza się ze względu na strzałkę ugięcia rurociągu i stabilność mieszków kompensacyjnych. Sposób podparcia mieszka kompensacyjnego powinien uniemożliwiać jego wyboczenie przez odpowiednie usztywnienie rury procesowej. Standardowym rozwiązaniem jest wykorzystanie czterech podpór przesuwnych w odległości pięciu i dziesięciu średnic kanału przepływowego z każdej strony mieszka kompensacyjnego. Lepszym rozwiązaniem jest zainstalowanie mieszka kompensacyjnego zaraz przy złączu bagnetowym, które stanowi podporę stałą

i bardzo dobrze usztywnia rurę procesową. Strzałka ugięcia rury procesowej związana jest z jej geometrią i obciążeniem, które w tym wypadku stanowi masa własna rury i masa czynnika przepływającego przez rurociąg. Wzór (6) pokazuje ogólne równanie strzałki ugięcia dla rury procesowej:

$$f = \frac{5ql^4}{384EI}, \quad (6)$$

$q$  – obciążenie ciągłe [N/m],

$l$  – odległość pomiędzy podporami [m],

$E$  – moduł Younga  $E = 200$  [GPa],

$I$  – moment bezwładności [m<sup>4</sup>].

Po uwzględnieniu momentu bezwładności, masy przypadającej na jednostkę długości dla kanału przepływowego i masy przepływającego czynnika, równanie (6) przekształcić można do postaci charakterystycznej dla rurociągu jednokanałowego (7):

$$f = \frac{5gl^4 \left( (D^2 - d^2) \rho_{304L} + d^2 \rho_k \right)}{24E(D^4 - d^4)}, \quad (7)$$



$D$  – średnica zewnętrzna kanału przepływowego [m],  
 $d$  – średnica wewnętrzna kanału przepływowego [m],  
 $\rho_{304L}$  – gęstość materiału z którego wykonana jest rura [kg/m<sup>3</sup>],  
 $\rho_k$  – gęstość przesyłanego czynnika kriogenicznego [kg/m<sup>3</sup>],  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie [N/kg],  
 $l$  – odległość między podporami [m].

Liczba podpór przesuwnych wyznacza się, zakładając dopuszczalną maksymalną strzałkę ugięcia, jaka może wystąpić w rurociągu i wyznaczając w ten sposób maksymalną odległość między kolejnymi podporami (8):

$$n = \frac{L}{l_{\max}} = \frac{L}{\sqrt[4]{\frac{24 f_{\max} E (D^4 - d^4)}{5g((D^2 - d^2)\rho_{304L} + d^2\rho_k)}}}, \quad (8)$$

$n$  – liczba podpór przesuwnych przypadających na rozpatrywany odcinek rurociągu,  
 $L$  – długość rozpatrywanego odcinka rurociągu [m],  
 $l_{\max}$  – odległość między podporami dla maksymalnej strzałki ugięcia [m].

Maksymalna strzałka ugięcia, jaka może wystąpić podczas pracy rurociągu jest określana przez projektanta, zależy ona od parametrów wytrzymałościowych i zastosowanego współczynnika bezpieczeństwa. Dlatego im wyższa wymagana stabilność mechaniczna rurociągu, tym mniejsza wartość strzałki ugięcia, co za tym idzie w rurociągu należy zastosować więcej podpór przesuwnych. Większa liczba podpór przesuwnych sprowadza się do zwiększenia strumienia ciepła  $Q_{P2}$  (9), który ma wpływ na strumień entropii generowany w rurociągu (4):

$$Q_{P2} = \sum_n^i Q_{P2i}. \quad (9)$$

Dzięki analizie entropowej powiązано parametry cieplne z parametrami mechanicznymi, w celu odnalezienia optymalnych warunków pracy rurociągu; należy uwzględnić również przepływowe parametry pracy rurociągu.

Rozpraszanie energii mechanicznej z termodynamicznego punktu widzenia jest bezpośrednio związane z produkcją entropii w polu przepływu. Generowanie entropii jest zlokalizowane w miejscu obecności gradientu prędkości i do jego określenia można posłużyć się równaniem bilansu. A. Bejan [7], wyprowadzając równanie umożliwiające wyznaczenie strumienia entropii generowanego na jednostkę długości, podczas przepływu w rurociągu na skutek spadków ciśnienia związanych z oporami przepływu (10), umożliwił uwzględnienie spadku ciśnienia podczas przepływu do analizy optymalizacyjnej urządzeń cieplno-przepływowych:

$$S'_{\Delta p} = \frac{\dot{m}}{\rho T_c} \frac{dp}{dx}. \quad (10)$$

W związku z równaniem (10) do wyznaczenia strumienia entropii generowanego podczas przepływu konieczne jest wyznaczenie spadków ciśnienia występującego

w rurociągu. Spadki ciśnienia podzielić można na liniowe związane z tarciami występującym na całej długości kanału podczas ruchu płynu i miejscowe wynikające z nagłych zmian przekroju kanału, kierunku przepływu i występowania przeszkód w kanale przepływowym. Liniowe spadki ciśnienia opisane są za pomocą równania (11) i charakteryzuje je współczynnik oporów liniowych  $\lambda_S$ , który używany jest w przypadku rurociągów, zamiast współczynnika tarcia ( $\lambda_S = 4f$ ):

$$\Delta P_{stL} = \lambda_S \frac{L}{D_h} \frac{w^2}{2} \rho, \quad (11)$$

$\Delta P_{stL}$  – strata liniowa [Pa],

$\lambda_S$  – współczynnik oporu liniowego  $\lambda_S = f(Re, \varepsilon)$ ,

$L$  – długości rurociągu [m].

Współczynnik oporu liniowego jest funkcją liczby Reynoldsa i chropowatości względnej wewnętrznej ściany rurociągu. Literatura podaje wiele empirycznych równań pozwalających na wyznaczenie współczynnika oporu liniowego w zależności od rodzaju przepływu. Dla przepływów laminarnych ( $Re \leq 2320$ ) najczęściej stosuje się równanie (12), natomiast w przypadku przepływu turbulentnego ( $Re > 4000$ ) najdokładniejsze wyniki daje wzór Colebrooka–White’a (13):

$$\lambda_S = \frac{64}{Re}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_S}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda_S}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right). \quad (13)$$

Do określenia spadku ciśnienia na skutek strat miejscowych (14) konieczne jest poznanie współczynnika oporu miejscowego, którego wartość zmienia się w zależności od rodzaju przeszkody oddziałującej na przepływ oraz od liczby Reynoldsa:

$$\Delta P_{stM} = \zeta \frac{w^2}{2} \rho \quad (14)$$

$\Delta P_{stM}$  – strata miejscowa [Pa],

$\zeta$  – współczynnik oporu miejscowego  $\zeta = f(Re)$ .

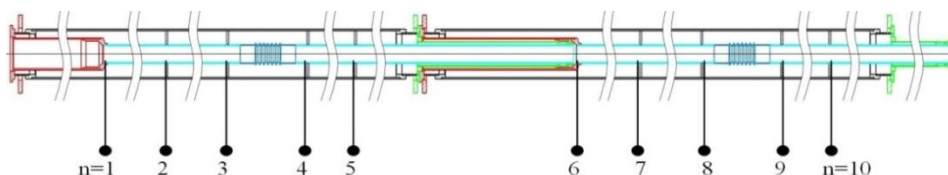
Po podstawieniu równania (11) i (14) do równania (10) i założeniu, że  $d = D_h$  określono strumień entropii generowany na skutek strat liniowych i wszystkich strat miejscowych (15):

$$\dot{S}_{\Delta p} = \frac{\dot{m} w^2}{2T_C} \left( \lambda_S \frac{L}{d} + \sum_n \zeta_n \right), \quad (15)$$

$n$  – numer miejscowego oporu przepływu.

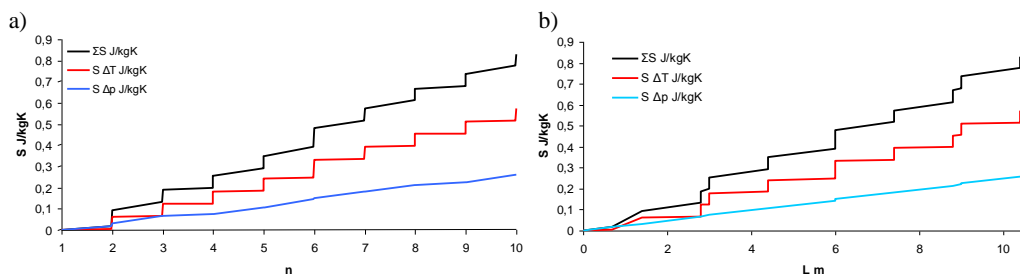
Na rysunku 5 przedstawiono schemat połączenia dwóch modułów jednokanałowej linii kriogenicznej. Na schemat naniesiono punkty odniesienia, w których do wyznaczenia przyrostów entropii posłużono się równaniami (4) i (15). Pozwoliło to na zo-

brazowanie sposobu wzrostu entropii w zależności od badanego miejsca z rozróżnieniem na przyrosty entropii wywołane oporami przepływu i dopływami ciepła.



Rys. 5: Ciepłoprzepływowy schemat połączenia dwóch modułów jednokanałowej linii kriogenicznej

Podczas analizy pominięto „efekt końców” przyjmując, że poziom entropii w punkcie 1 jest zerowy. Poziomy entropii przepływającego czynnika w odniesieniu do naniesionych punktów pokazane zostały na rysunku 6 (a). Rysunek 6 (b) przedstawia te same poziomy entropii odniesione do rzeczywistych długości. Przyrost entropii na skutek dopływów ciepła ma mocno miejscowy charakter, co jest związane z przewodzeniem ciepła przez podpory – w miejscu zainstalowania każdej podpory łączącej ciepły płaszcz próżniowy z zimną rurą procesową następuje skokowy wzrost poziomu entropii. Natomiast przyrost entropii generowanej na skutek spadków ciśnienia ma charakter liniowy z niewielkim skokiem w miejscach zainstalowania kompensatorów.



Rys. 6: Poziomy entropii przepływającego czynnika: a) w odniesieniu do punktów  $n = 1$  do 10, b) w odniesieniu do rzeczywistej długości

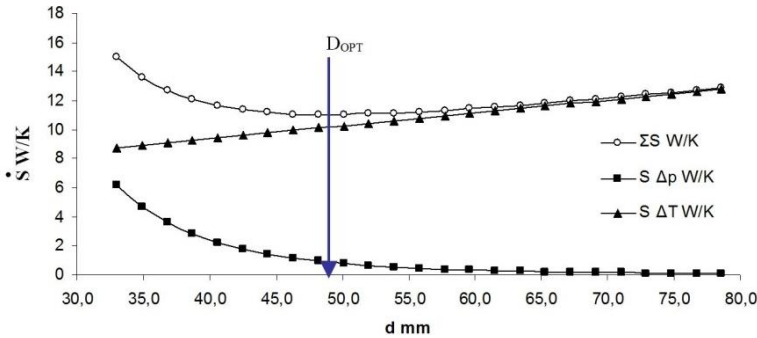
#### 4. OPTIMALIZACJA JEDNOKANAŁOWYCH LINII PRZESYŁOWYCH

Wykorzystując równania (4) i (15), wyznaczono funkcję opisującą sumaryczny strumień entropii generowanej w rurociągu jednokanałowym (16):

$$\dot{S} = \sum_i \dot{S}_{\Delta T} + \sum_j \dot{S}_{\Delta p} = \frac{\sum Q (T_o - T_c)}{T_c^2 \left(1 + \frac{T_o - T_c}{T_c}\right)} + \frac{\dot{m} w^2}{2T_c} \left(\lambda_s \frac{L}{d} + \sum_n \zeta_n\right) \quad (16)$$

Równanie (16) umożliwiło wyznaczenie sumarycznego strumienia entropii generowanego w jednokanałowej linii kriogenicznej o zadanych parametrach: strumień masy gazu  $\dot{m} = 2$  kg/s, długości rurociągu  $L = 100$  m, czynnik przesyłany – ciekły azot o temperaturze  $T_c = 65$  K i ciśnieniu początkowym  $p_{we} = 5$  bar. Na rysunku 7 przedstawiono zależność strumienia entropii generowanej na skutek oporów przepływu

i dopływów ciepła w funkcji średnicy kanału przepływowego. Strumień entropii generowanej na skutek dopływów ciepła w zbadanym zakresie średnic wzrasta liniowo wraz ze wzrostem średnicy kanału przepływowego, natomiast strumień entropii generowanej na skutek spadków ciśnienia narasta wykładniczo ze spadkiem średnicy kanału, co jest związane z charakterystyką oporów przepływu. Wyznaczenie sumarycznego strumienia generowanej entropii pozwoliło na odnalezienie minimum z równania (16), a tym samym odnaleziona została optymalna średnica dla zadanych warunków.

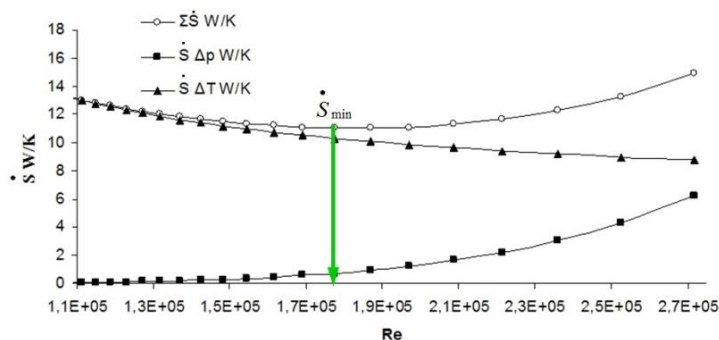


Rys. 7: Zależność strumienia generowanej entropii od średnicy rury procesowej w rurociągu przesyłającym przechłodzony, ciekły azot

W przypadku wyznaczonej średnicy optymalnej kanału przepływowego warto zauważyć, że zastosowanie rury procesowej o średnicy mniejszej niż wyznaczona bardzo szybko pociąga za sobą znaczny wzrost sumarycznie generowanej entropii, mniejsze konsekwencje pociąga za sobą użycie kanału przepływowego o większej średnicy niż optymalna. Wyznaczając strumień generowanej entropii w funkcji liczby Reynoldsa umożliwiło odnalezienie jej optymalnej wartości, dla której słuszne jest równanie (17):

$$\frac{d\dot{S}}{d(\text{Re})} = 0 \Rightarrow \dot{S}_{\min}. \quad (17)$$

Na rysunku 8 pokazano w jaki sposób zmieniają się strumienie entropii generowanej na skutek spadków ciśnienia i dopływów ciepła w funkcji liczby Reynoldsa, dla rurociągu jednokanałowego przesyłającego przechłodzony, ciekły azot. Optymalna wartość liczby Reynoldsa jest stosunkowo duża, jednak dopuszczalna dla transportu czynników kriogenicznych, jej wartość odpowiada przepływowi turbulentnemu.

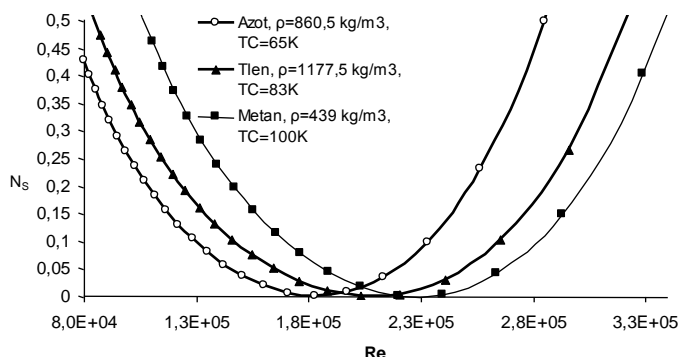


Rys. 8: Strumień generowanej entropii w funkcji liczby Reynoldsa dla przeflowanego, ciepłego azotu o parametrach  $P_{we} = 5 \text{ bar}$ ,  $T_C = 65 \text{ K}$

Znając optymalną liczbę Reynoldsa i odpowiadający jej minimalny strumień generowanej entropii, z równania wyznaczono wskaźnik entropii generowanej na skutek spadków ciśnienia i różnicy temperatur –  $N_S$ :

$$N_S = \frac{\dot{S}}{\dot{S}_{\min}}. \quad (18)$$

Rezultaty przeprowadzonej analizy przedstawia rysunek 9.



Rys. 9: Wskaźnik generowanej entropii w funkcji liczby Reynoldsa dla wybranych gazów

Wskaźnik generowanej entropii umożliwia w łatwy sposób ocenić, jaka jest perspektywa poprawy jakości danego rurociągu przez poszukiwanie optymalnej średnicy kanału przepływowego, uwzględniając parametry cieplne, mechaniczne i przepływowe.

## 5. PODSUMOWANIE

Ponieważ opłacalność używania rurociągów kriogenicznych zależy od ich sprawności, zasadne jest opracowanie metody optymalizacji, uwzględniając wiele często sprzecznych parametrów charakteryzujących linie kriogeniczne. W niniejszej publikacji zaproponowano użycie metody minimalizacji przyrostów entropii generowanej w przesyłanym czynnikiem kriogenicznym. Metoda ta pozwala na powiązanie sprzecznych

parametrów, od których zależy sprawność rurociągów kriogenicznych za pomocą jednego wskaźnika. Zaprezentowane rozwiązanie umożliwiło znalezienie ogólnego sposobu wyznaczenia optymalnej średnicy kanału przesyłowego. Opisany sposób optymalizacji umożliwia znalezienie najlepszych parametrów konstrukcyjnych rurociągów kriogenicznych bez względu na transportowany czynnik. Za pomocą minimalizacji zaprezentowanej funkcji (16) można wykonać optymalizację wielu innych urządzeń ciepło-przepływowych, co potwierdza uniwersalny charakter metody optymalizacji opierającej się na minimalizacji generowanej entropii.

## LITERATURA

- [1] David A. Wood, *A review and outlook for the global LNG trade*, Journal of Natural Gas Science and Engineering 9, 16–27, 2012.
- [2] Rybak W., *Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego węgla*, w: Nowak W., Czakiert T. (red.), *Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub>*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 120–130, 2012.
- [3] Chorowski M., *Kriogenika, podstawy i zastosowania*, IPPU MASTA, Gdańsk 2007.
- [4] Don M., Zhen Z., *Natural gas prices, LNG transport costs, and the dynamics of LNG imports*, Energy Economics, Vol. 33, Issue 2, , 217–226, 2011.
- [5] Poliński J., Chorowski M., Choudhury A., Datta T S., *Synthesis of the multilayer cryogenic insulation modelling and measurements*, Advances in cryogenic engineering: transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC, Chattanooga, Tennessee, 16-20 July 2007 / eds J. G. Weisend II [i in.]. Melville, NY: American Institute of Physics, 1367–1374, 2008.
- [6] Szargut J., Petela R., *Egzergia*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1965, Warszawa.
- [7] Bejan A., *Entropy generation minimization: The method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes*, Boca Raton: CRC Press, 1996.
- [8] Gorla R. S. R., Byrd L. W., Pratt D. M., *Second law analysis for microscale flow and heat transfer*, Applied Thermal Engineering 27, 1414–1423, 2007.
- [9] Jafarian A., Saidi M. H., Hannami S. K., *Second law based modeling to optimum design of capacity pulse tube refrigerators*, International Journal of Refrigeration 32, 58–69, 2009.
- [10] Aung Maty, Kyaw Thu, *A second law analysis and entropy generation minimization of an absorption chiller*, Applied Thermal Engineering 31, 2405–2413, 2011.