



Badania przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych

Investigation of the thermal conductivity of cylindrical insulation



Mgr inż. Ewa Kręcielewska

Laboratorium Badawcze
Veolia Energia Warszawa S.A.
ewa.kręcielewska@veolia.com



Mgr inż. Iwona Mazurkiewicz

Laboratorium Badawcze
Veolia Energia Warszawa S.A.
iwona.mazurkiewicz@veolia.com



Mgr inż. Katarzyna Omen-Mizerska

Laboratorium Badawcze
Veolia Energia Warszawa S.A.
katarzyna.omen-mizerska@veolia.com



Mgr inż. Krzysztof Strzeżek

Laboratorium Badawcze
Veolia Energia Warszawa S.A.
krzysztof.strzezek@veolia.com

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, współczynnik przewodzenia ciepła, aparat rurowy, rury preizolowane, badania biegłości, "Round Robin Test", wiarygodność wyników, pianka PUR, EN 253, ISO 8497

Streszczenie

Współczesne wymagania stawiane sieciom ciepłowniczym narzucają konieczność weryfikowania parametrów stosowanych wyrobów izolacyjnych.

Laboratorium Badawcze Veolia Energia Warszawa S.A., wywodzące się z dawnego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Ciepłownictwa Stołecznego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej (OBRC SPEC), prowadzi badania wyrobów izolacyjnych nieprzerwanie od ponad 30 lat. Długoletnie doświadczenie, poparte od 2003 roku oficjalną akredytacją Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) oraz od 2009 roku rekomendacją do badań certyfikacyjnych Europejskiego Stowarzyszenia Ciepłowników EuroHeat&Power (EHP), stanowi fundament rygorystycznych procedur badawczych.

Artykuł przedstawia szczegółową analizę wpływu reżimu laboratoryjnego, konstrukcji aparatury badawczej oraz wpływu innych czynników na ważność i wiarygodność uzyskiwanych wyników badania przewodności cieplnej.

Keywords: conductivity, thermal conductivity coefficient, pipe apparatus, preinsulated pipes, proficiency testing, "Round Robin Test", reliability of results, PUR foam, EN 253, ISO 8497

Abstract

Modern requirements for district heating networks make it necessary to verify the parameters of the insulation products used.

The Veolia Energia Warszawa S.A. Testing Laboratory, which has its roots in the former Research and Development Centre for District Heating of the Capital City Heat Energy Company (OBRC SPEC), has been testing insulation products continuously for over 30 years. This long-standing experience, supported since 2003 by official accreditation from the Polish Centre for Accreditation (PCA) and since 2009 by a recommendation for certification testing from European association promoting sustainable district heating and cooling in Europe and beyond – EuroHeat&Power (EHP), forms the foundation of rigorous testing procedures.

The article presents a detailed analysis of the impact of a strictly defined laboratory procedure, the design of testing apparatus and other factors on the validity and reliability of the obtained thermal conductivity test results.

Wprowadzenie

Badania współczynnika przewodzenia ciepła prowadzone były w Laboratorium Badawczym (LB) od końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku na aparacie rurowym (Fotografia 1), zbudowanym wg normy ASTM C335 (ASTM, 1995).

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych wydana została nor-

ma ISO 8497 (ISO, 1994) (oraz w oparciu o nią EN ISO (CEN, 1996) i PN-EN ISO (PN, 1999)) – na podstawie, której skonstruowany został nowy aparat rurowy (Fotografia 2).

Metoda badania przewodności cieplnej na aparacie rurowym, jako pierwsza w Laboratorium Badawczym, uzyskała akredytację PCA. Od tego czasu wykonano ponad 200 pomiarów przewodności cieplnej zarówno otulin i mat (z pianek PUR, PIR, PE czy wełny mineralnej) oraz

rur preizolowanych z izolacją z pianki PUR i z izolacją wielowarstwową (do przesyłu pary). Badania prowadzone są w celu sprawdzenia właściwości izolacyjnych wyrobów nowych, po starzeniu (naturalnym i sztucznym) i realizowane na zlecenie producentów, przedsiębiorstw energetyki cieplnej oraz inwestorów.



Fotografia 1. Aparat rurowy zbudowany w Laboratorium Badawczym pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku wg ASTM C335 (ASTM, 1995). Źródło: opracowanie własne
Photo 1. A pipe testing apparatus built at Testing Laboratory in the late 1980s in accordance with ASTM C335 (ASTM, 1995). Source: author's own study



Fotografia 2. Nowy aparat rurowy zbudowany wg PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999). Źródło: opracowanie własne
Photo 2. New pipe testing apparatus manufactured in accordance with PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999). Source: author's own study

Do 2005 roku badania przewodności cieplnej rur preizolowanych prowadzono w oparciu o normę ISO 8497, na którą powoływała się PN-EN 253 (PKN, 1993, 1999). Izolację demontowano z zespołu rurowego i bez osłony umieszczano na rurze badawczej.

W 2005 roku zalecono prowadzenie badań przewodności cieplnej zgodnie z PN-EN 253 (PKN, 2005) – załącznik G "Przewodność cieplna rur preizolowanych – Metoda badania", opracowany na podstawie EN ISO 8497 (CEN, 1996). Pierwotnie próbkę przygotowywano do badań zdejmując izolację wraz z osłoną z rury przewodowej i tak przygotowany obiekt zakładano na rurę badawczą. Aktualnie badanie przewodności cieplnej rur preizolowanych przeznaczonych do stosowania w ciepłownictwie prowadzone jest zgodnie z PN-EN 253 (PKN, 2024) – załącznik C "Thermal conductivity of factory made pipe assemblies – Test procedure", opracowany na podstawie EN ISO 8497 (CEN, 1996).

Przewodność cieplna izolacji cylindrycznych

Przewodność cieplna to właściwość fizyczna materiału określająca jego zdolność do przewodzenia ciepła, mająca w ciepłownictwie szczególne znaczenie, ponieważ wpływa na:

- jednostkowe straty ciepła,
- straty przesyłanego ciepła,
- koszty eksploatacyjne,
- efektywność pracy sieci ciepłowniczej.

Przewodność cieplną (współczynnik przewodzenia ciepła) izolacji cylindrycznych wyznacza się laboratoryjnie, na podstawie wyników pomiarów temperatury na powierzchni rury badawczej¹ i zewnętrznej powierzchni izolacji, strumienia ciepła (dostarczonej mocy) oraz wymiarów geometrycznych próbki korzystając ze wzorów (1)÷(3) oraz oznaczeń przedstawionych na Rysunku 1.

$$\lambda_i = \frac{\phi \cdot \ln \frac{D_i}{d_o}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1)$$

$$q = \frac{\phi}{L} \quad (2)$$

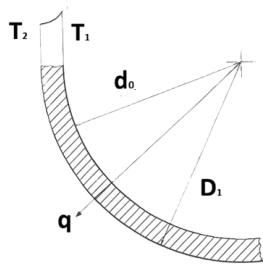
$$\lambda_i = \frac{q \cdot \ln \frac{D_i}{d_o}}{2 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3)$$

gdzie:

- λ_i – przewodność cieplna izolacji, W/(m · K)
- ϕ – strumień ciepła przenikający przez przegrodę walcową (izolację), W
- L – długość odcinka pomiarowego, m
- q – liniowa gęstość strumienia ciepła, W/m
- D_i – zewnętrzna średnica izolacji, m
- d_o – zewnętrzna średnica rury badawczej, m
- T_1 – temperatura na powierzchni rury badawczej, °C
- T_2 – temperatura na zewnętrznej powierzchni izolacji, °C

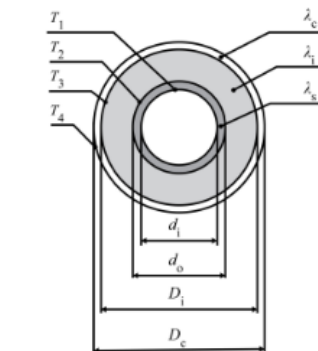
W przypadku rur preizolowanych przewodność cieplna izolacji wyznaczana jest w oparciu o pomiar strumienia ciepła, pomiar temperatury na powierzchni osłony i rury

¹ rura badawcza – stalowa rura, na której montuje się izolację cylindryczną, a w przypadku rur preizolowanych – rura przewodowa



Rysunek 1. Rozkład temperatury w izolacji jednowarstwowej (PKN, 2022)

Figure 1. Temperature distribution in single-layer insulation (PKN, 2022)



Rysunek 2. Symbole (PKN, 2024)

Figure 2. Symbols (PKN, 2024)

przewodowej (badawczej), pomiarów wymiarów geometrycznych tj. średnicy zewnętrznej rury stalowej, średnicy zewnętrznej i grubości ścianki osłony oraz przyjętych wartości przewodności cieplnej osłony i rury stalowej. Wzór (1) przyjmuje zatem postać wzoru (4) wraz z oznaczeniami przedstawionymi na Rysunku 2.

$$\lambda_i = \frac{\ln \frac{D_i}{d_o}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\phi} - \frac{1}{\lambda_c} \cdot \ln \frac{D_c}{D_i} - \frac{1}{\lambda_s} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i}} \quad (4)$$

gdzie:

- λ_i – przewodność cieplna izolacji, W/(m · K)
- ϕ – strumień ciepła, W
- L – długość odcinka pomiarowego, m
- D_c – zewnętrzna średnica osłony, m
- D_i – zewnętrzna średnica izolacji = wewnętrzna średnica osłony, m
- d_o – zewnętrzna średnica rury stalowej, m
- d_i – wewnętrzna średnica rury stalowej, m
- T_1 – temperatura na powierzchni rury badawczej, °C
- T_4 – temperatura na zewnętrznej powierzchni osłony, °C
- λ_c – przewodność cieplna osłony, W/(m · K), $\lambda_c = 0,4$ W/(m · K) (PKN, 2024)
- λ_s – przewodność cieplna stali, W/(m · K), $\lambda_s = 50$ W/(m · K) (PKN, 2024)

Typy aparatów rurowych

Badania przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych (w tym z rur preizolowanych) prowadzone są na urządzeniach skonstruowanych wg ASTM C335 (ASTM, 1995) oraz ISO 8497 (ISO, 1994).

Są to:

1. Aparat rurowy z cylindrami osłonowymi na końcach rury badawczej² (Guarded End Apparatus)

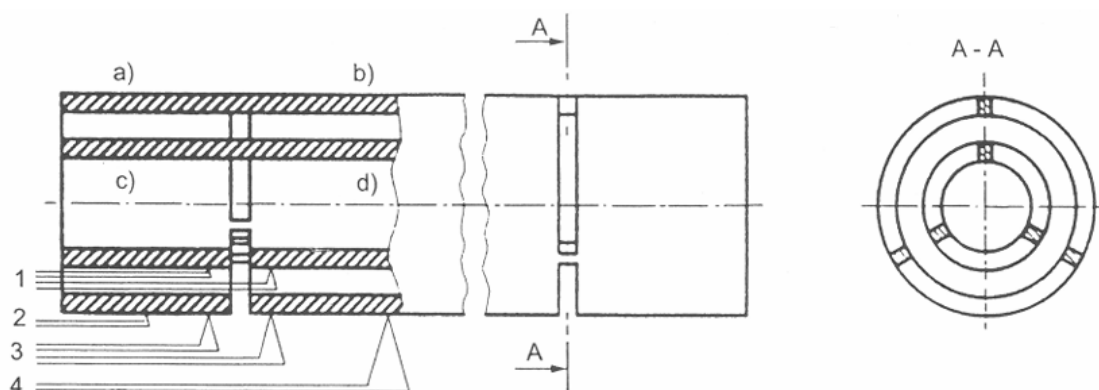
W urządzeniu tego typu (Rysunek 3) oprócz elementu grzejnego odcinka pomiarowego, na końcach rury badawczej znajdują się dodatkowe oddzielnie ogrzewane sekcje wg PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999) cylindry osłonowe³. System automatycznej regulacji zapewnia uzyskanie **jednakowej temperatury na końcach** (w sekcjach końcowych) **i w środku** (na odcinku pomiarowym/ sekcji pomiarowej) rury badawczej. Zerowy gradient temperatury eliminuje osiowy przepływ ciepła, dzięki czemu cały przepływ ciepła na odcinku pomiarowym rury badawczej odbywa się w kierunku promieniowym.

2. Aparat badawczy z wzorcowanymi lub obliczonymi końcami rury (Calibrated or Calculated-End Apparatus)

W aparatach tego typu (Rysunek 4 i 5) w celu zminimalizowania osiowego przepływu ciepła wykorzystuje się zaizolowane nasadki (kołpaki) montowane na końcach odcinka pomiarowego. Osiowe straty ciepła przez kołpaki określane są poprzez bezpośrednią kalibrację nasadek (metoda z wzorcowanymi końcami) albo obliczeniowo z wykorzystaniem znanych właściwości materiału nasadek (metoda z obliczonymi końcami). Ciepło dostarczone do układu w trakcie badania należy pomniejszyć o straty ciepła kołpaków. **Kołpaki wzorcowane** posiadają geometrię i właściwości

² zgodnie z PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999)

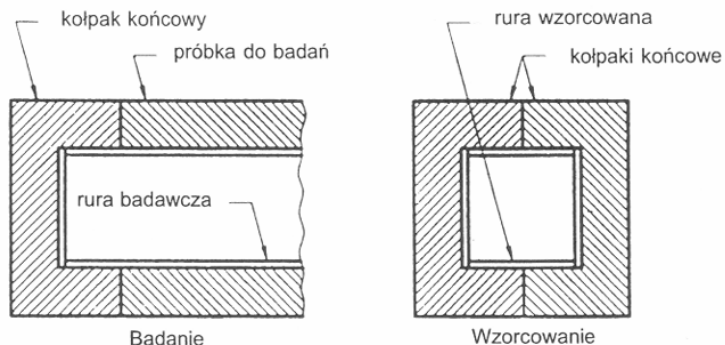
³ nazwa "cylinder osłonowy" użyta w polskiej normie PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999) sugeruje zabezpieczenie końca rury badawczej odrębnym, dodatkowym elementem. W rzeczywistości są to sekcje końcowe rury badawczej wyposażone w elementy grzewcze stosowane w celu ograniczenia przepływu ciepła w kierunku osiowym



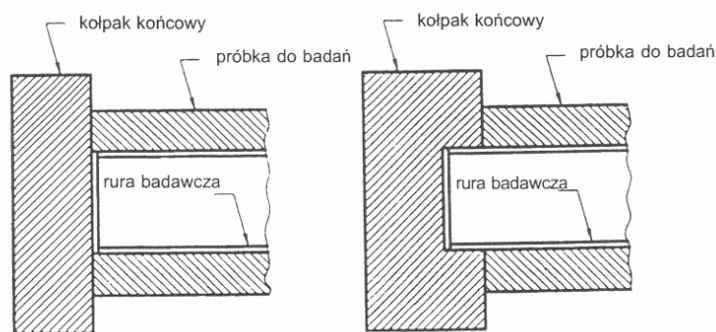
Rysunek 3. Aparat badawczy z cylindrami osłonowymi na końcach rury badawczej do badania izolacji cylindrycznych (PKN, 1999).

Zastosowane oznaczenia: 1 – termoelementy kontrolne pomiędzy sekcją pomiarową, a końcem rury grzejnej, 2 – termoelement do pomiaru temperatury zewnętrznej końca rury badawczej (cylindra), 3 – termoelementy kontrolne pomiędzy sekcją pomiarową, a końcem rury badawczej, 4 – termoelement do pomiaru temperatury zewnętrznej sekcji pomiarowej rury badawczej, a, c – sekcja końcowa rury pomiarowej i grzejnej, b, d – sekcja pomiarowa rury pomiarowej i grzejnej

Figure 3. Test apparatus with protective cylinders at the ends of the test pipe for testing cylindrical insulation (PKN, 1999). Symbols used: 1 – control thermocouples between the measuring section and the end of the heating pipe, 2 – thermocouple for measuring the external temperature of the end of the test pipe (cylinder), 3 – control thermocouples between the measuring section and the end of the test pipe, 4 – thermocouple for measuring the external temperature of the measuring section of the test pipe, a, c – end sections of the measuring and heating pipes, b, d – measuring sections of the measuring and heating pipes



Rysunek 4. Aparat badawczy z wzorcowanymi końcami rury (PKN, 1999)
Figure 4. Test apparatus with calibrated pipe ends (PKN, 1999)



Rysunek 5. Aparat badawczy z obliczonymi kołpakami końcowymi (PKN, 1999)
Figure 5. Test apparatus with calculated end caps (PKN, 1999)

cieplne zbliżone do badanej próbki. Osiowe straty ciepła wyznaczone są doświadczalnie na rurze wzorcowanej wyciętej z odcinka rury badawczej.

Kołpaki obliczane wykonane są z jednorodnej izolacji termicznej o znanej przewodności cieplnej wyznaczonej na aparacie płytowym przy temperaturze stosowanej podczas badania na aparacie rurowym. Osiowe straty ciepła korygowane są metodami van Rinsuma, Nukiyamy lub

różnic skończonych.

Obliczanie przewodności cieplnej. Po badaniu prowadzonym na:

- aparacie rurowym z cylindrami osłonowymi na końcach rury badawczej przewodność cieplną izolacji wyznacza się stosując wzór (1) lub (4),
- na aparacie badawczym z wzorcowanymi lub obliczonymi końcami rury obliczenia przewodności cieplnej wykonuje się po wprowadzeniu poprawek uwzględniających straty ciepła przez kołpaki. Zgodnie z wymaganiami PN-EN 253 (PKN, 2024), Załącznik C p. C.3.2 w **sprawozdaniu z badań** należy podać straty ciepła przez kołpaki.

Metoda badania przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych

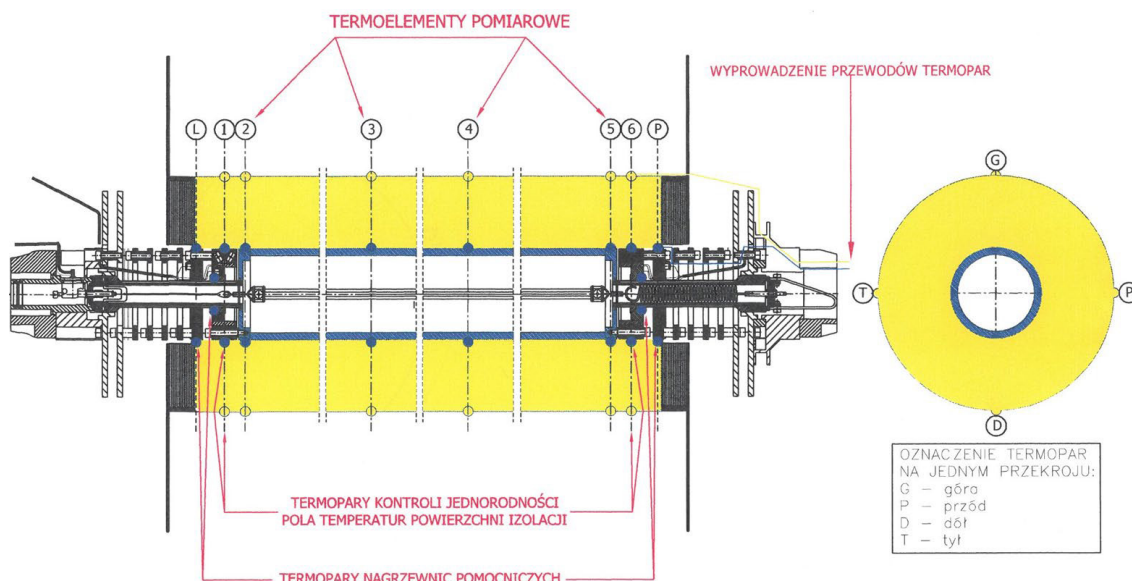
Badanie polega na wyznaczeniu przewodności cieplnej λ_{tm} w ustalonej średniej temperaturze izolacji t_m w zależności od przeznaczenia wyrobu.

Badanie przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych należy prowadzić w co najmniej trzech cyklach pomiarowych (przy minimum trzech założonych temperaturach rury badawczej T_{1i}).

Na podstawie pomiarów strumienia ciepła ϕ_{1i} , temperatury rury badawczej T_{1i} oraz temperatury powierzchni zewnętrznej próbki T_{4i} w jednym cyklu pomiarowym wyznaczany jest, zgodnie z wzorem (1) lub (4), współczynnik przewodzenia ciepła λ_{tmi} w średniej temperaturze t_{mi} ⁴, a następnie obliczana jest przewodność cieplna izolacji λ_{tm} przy temperaturze t_m .

Zestawienie wymagań i warunków prowadzenia badań izolacji cylindrycznych oraz rur preizolowanych stosowanych w ciepłownictwie opisane w (PKN, 1999, 2024) przedstawiono w Tabeli 1.

⁴ $t_{mi} = (T_{1i} + T_{2i})/2$ lub $t_{mi} = (T_{1i} + T_{3i})/2$, gdzie T_{3i} – temperatura na zewnętrznej powierzchni izolacji (wewnętrznej powierzchni osłony) w przypadku elementów preizolowanych



Rysunek 6. Schemat aparatu rurowego. Źródło: Opracowanie własne – Dokumentacja techniczna stanowiska badawczego SB-06 (Badizol)
Figure 6. Testing apparatus scheme. Source: Author's own study – Technical documentation for test stand SB-06 (Badizol)

Tabela 1. Wymagania i warunki w zakresie badania przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Requirements and conditions for testing the thermal conductivity of cylindrical insulation. Source: author's own study

LP.	NORMA	TYP APARATU BADAWCZEGO		
		Z "CYLINDRAMI OSŁONOWYMI" NA KOŃCACH RURY BADAWCZEJ	Z WZORCOWANYMI KOŁPAKAMI KOŃCOWYMI	Z OBLICZONYMI KOŁPAKAMI KOŃCOWYMI
Próbka do badań				
1.	PN-EN ISO 8497 p. 5.1	Otuliny o kołowym przekroju poprzecznym, maty elastyczne lub lamelowe		
2.	PN-EN 253 p. C.2.1	Odcinek rury preizolowanej (o kołowym przekroju poprzecznym)		
Temperatura otoczenia				
3.	PN-EN ISO 8497 p. 5.2, 9.2	(15 ± 35)°C Temperatura otoczenia podczas badania może się wahać o nie więcej niż ± 1K lub ± 1% różnicy między temperaturą powierzchni zewnętrznej próbki a temperaturą otoczenia		
4.	PN-EN 253 p. C.2.2 p. C.5.4	(23 ± 2)°C Temperatura otoczenia podczas badania może się wahać o nie więcej niż ± 1°C		
Średnica rury badawczej/ długość odcinka pomiarowego				
5.	PN-EN ISO 8497 p. 7.2	Nie ma żadnych ograniczeń dotyczących średnicy rury badawczej		
		L = min. 1 m	L = min. 2 m	
6.	PN-EN 253 p.C.3.	Nie ma żadnych ograniczeń dotyczących średnicy rury badawczej, przy badaniu typu ⁵ wymiary zespołu rurowego DN50/125		
		L = min. 1 m	L = min. 2 m	
Pomiar temperatury powierzchni próbki do badań - rozmieszczenie termoelementów				
7.	PN-EN ISO 8497 p. 8.6	Min. 4 czujniki temperatury na zewnętrznej powierzchni osłony, rozmieszczone na co najmniej 4 częściach (w środku każdej części) wzdłuż odcinka pomiarowego po obwodzie w jednakowych odległościach od siebie i odstepie kątowym między sąsiednimi termoelementami (45 ± 90)° tak aby miejsce pomiaru było oddalone w miarę możliwości o odstęp równy grubości próbki do badań od każdej spoiny lub innej nierówności		
8.	PN-EN 253 p.C.4.4	Min. 4 czujniki temperatury na zewnętrznej powierzchni osłony, rozmieszczone w równych odstępach spiralnie wzdłuż odcinka pomiarowego		
Pomiar temperatury rury badawczej - rozmieszczenie termoelementów				
9.	PN-EN ISO 8497 p. 7.5	Min. 4 czujniki temperatury na zewnętrznej powierzchni próbki lub 1 czujnik na każde 150 mm długości rury, zależnie od tego, która wartość jest większa, rozmieszczone w równych odstępach spiralnie wzdłuż odcinka pomiarowego		podobnie jak w innych aparatach
				przy korekcie van Rinsuma: min. 4 czujniki temp. na środku rury badawczej ⁶
10.	PN-EN 253 p.C.4.4	Min. 4 czujniki temperatury na wewnętrznej powierzchni rury badawczej, rozmieszczone w równych odstępach spiralnie wzdłuż odcinka pomiarowego		
Temperatura rury badawczej				
11.	PN-EN ISO 8497 p. 9.3	W min. 3 lub 4 temperatury rury badawczej, rozkład w przybliżeniu równomierny w odpowiednim zakresie		
12.	PN-EN 253 p. C.5.5	W min. 3 temperaturach roboczych z dokładnością ± 0,3°C, zadana temperatura (80 ± 10)°C, przy badaniu typu: zadana temperatura (70 ± 90)°C w równych odstępach		

⁵ badanie typu to, wg EN 17248 (PKN, 2020), seria badań mających na celu sprawdzenie, czy element systemu zespołu rurowego lub zespołu złącza spełnia wszystkie wymagania określone w odpowiedniej normie. Wg EN 253 (PKN, 2024) badanie typu służy do wstępnej weryfikacji materiałów i metod produkcji. Nowe badanie typu należy przeprowadzić w przypadku istotnych zmian materiałów lub metod produkcji

⁶ rozmieszczone w równych odstępach po obwodzie, dodatkowo po 4 czujniki w odległości x = min. 200 mm od środka w kierunkach końców rury rozmieszczone w równych odstępach po obwodzie

LP.	NORMA	TYP APARATU BADAWCZEGO		
		Z "CYLINDRAMI OSŁONOWYMI" NA KOŃCACH RURY BADAWCZEJ	Z WZORCOWANYMI KOŁPAKANAMI KOŃCOWYMI	Z OBLICZONYMI KOŁPAKANAMI KOŃCOWYMI
Temperatura kondycjonowania				
13.	PN-EN ISO 8497	Brak wymogów dotyczących kondycjonowania		
14.	PN-EN 253 p. C.4.1	(23 ± 2)°C przez 72 godz., przy badaniu typu: (23 ± 2)°C przez (5 ± 1) tydz. po wyprodukowaniu		
Osiove straty ciepła				
15.	PN-EN ISO 8497	p. 9.5.2.2 osiowy strumień ciepła na końcach ≤ 1,0 % średniego strumienia ciepła	p. 10 określić i podać straty ciepła przez kołpaki końcowe	
16.	PN-EN 253 p. C.5.7	Osiowy strumień ciepła na końcach ≤ 0,5 % średniego strumienia ciepła	Określić i podać straty ciepła przez kołpaki końcowe	
Średnia temperatura izolacji t _m				
17.	PN-EN ISO 8497	Brak (ustalana ze zleceniodawcą)		
18.	PN-EN 253 p. 4.5.7	Temperatura odniesienia 50°C		
Przewodność cieplna				
19.	PN-EN ISO 8497 p. 11	Należy obliczyć w odniesieniu do każdej z trzech lub więcej temperatur rury badawczej		
20.	PN-EN 253 p. C.6.1	Należy obliczyć metodą regresji liniowej na podstawie wyników uzyskanych z trzech temperatur rury badawczej		
Stan ustalony				
21.	PN-EN ISO 8497 p. 9.5.3	Różnica między pojedynczymi pomiarami a średnią z co najmniej 3 szeregów ⁷ serii pomiarów (temperatury powierzchni odcinka pomiarowego rury badawczej oraz strumienia ciepła): max. 1% jeżeli moc mierzy się przyrządem całkującym, czas trwania każdej obserwacji ≥ 0,5 godz.		
22.	PN-EN 253 p. C.5.8			
Raport z badań				
23.	PN-EN ISO 8497 p. 13 PN-EN 253 p. C.1 p. C.6.1	W raporcie z badania przewodności cieplnej należy umieścić informacje nt: – badanej próbki (m.in. wymiary, sposób poboru), – rodzaju aparatu rurowego, – warunków kondycjonowania, – średniej temperatury rury badawczej, – średniej temperatury powierzchni zewnętrznej próbki, – warunków otoczenia (rodzaj gazu, średnia temperatura otoczenia, jeśli to wymagane - prędkość powietrza), – średniej mocy wejściowej odcinka pomiarowego i wszystkie dokonane korekty, – średniej temperatury izolacji, – przewodności cieplnej przy średniej temperaturze izolacji, – niepewności pomiaru, – odstępstwa od normy, – wykonanych obliczeń lub powołanie się na specjalne obliczenia, – przewodność cieplną należy podawać wraz z gęstością pianki, wymiarem komórki, wytrzymałością na ściskanie i składem gazu w komórkach izolacji – p. 4.5.7 (PKN, 2024), W przypadku badań elementów preizolowanych przewodność cieplna powinna być zaokrąglona do wartości najbliższej 1/1 000 W/(m·K) – p. C.6.1 (PKN, 2024)		

⁷ szereg pomiarowy – 3 obserwacje pomiarowe realizowane w odstępach co 10 minut

Badania przewodności cieplnej prowadzone w Laboratorium Badawczym VEOLIA ENERGIA WARSZAWA S.A.

Budowa aparatu rurowego

Laboratorium Badawcze dysponuje **aparatem z "cylindrami osłonowymi na końcach rury badawczej"** (Guarded End Apparatus) przedstawionymi na Rysunku 6.

Konstrukcja ta jest przystosowana do badań izolacji o średnicach wewnętrznych 33,7 mm, 60,3 mm, 88,9 mm i 273,0 mm oraz odcinków rur preizolowanych DN 50, 65, 80.

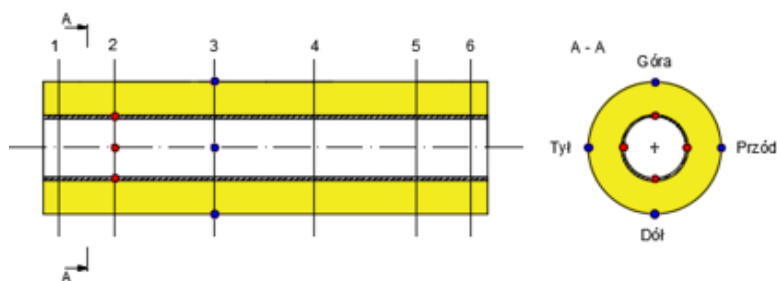
Aparat znajduje się w zamkniętym, klimatyzowanym pomieszczeniu.

Próbka do badań umieszczana jest wewnątrz termostatyzowanej komory posiadającej podwójną ściankę. Powierzchnia wewnętrznej ścianki pokryta jest matową czarną farbą ograniczającą promieniowanie cieplne z otoczenia próbki. Pomiedzy ścianami komory wbudowana jest węzownica przez którą płynie woda chłodząca, co zapewnia w trakcie badania stałe warunki otoczenia próbki w zakresie $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ oraz różnicę temperatury poniżej 1K. Temperatura w komorze rejestrowana jest przy pomocy 2 czujników.

Wewnątrz rury badawczej umieszczona jest grzałka elektryczna. W celu zapewnienia równomiernego rozkładu temperatury (wyeliminowanie zjawiska konwekcji) w rurze badawczej utrzymywana jest próżnia. Pomiar temperatury rury badawczej oraz powierzchni zewnętrznej próbki oparty jest na pomiarze napięcia na termoelementach (termoparach) konstantan-żelazo/konstantan-miedź.

Pomiar temperatury odcinka pomiarowego rury badawczej odbywa się przy zastosowaniu 16 termoelementów (Rysunek 7) rozmieszczonych równomiernie, po 4 na każdym z czterech przekrojów (góra, przód, dół, tył). Na obu końcach odcinka pomiarowego rury badawczej umieszczone są niezależne ogrzewane segmenty tzw. "cylindry osłonowe". W ogrzewanych segmentach umieszczone są termoelementy do pomiaru temperatury. Na podstawie wyników pomiaru temperatury system automatycznej regulacji dąży do utrzymania zerowej różnicy temperatury między główną sekcją pomiarową, a sekcjami osłonowymi. Zerowy gradient temperatury eliminuje osiowy strumień ciepła, co wymusza promieniowy kierunek strumienia ciepła i równomierny rozkład temperatury na całej długości pomiarowej próbki.

Pomiar temperatury na powierzchni zewnętrznej próbki realizowany jest przez 24 termoelementy rozmieszczone w sześciu przekrojach, w czterech przekrojach na odcinku pomiarowym oraz w dwóch przekrojach



Rysunek 7. Rozkład termoelementów. Źródło: opracowanie własne
Figure 7. Arrangement of thermocouples. Source: author's own study

na końcach próbki (Rysunek 7).

Zastosowanie tak rozbudowanego układu pomiarowego jest podyktowane faktem, że rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej może być nierównomierny na skutek zjawiska konwekcji w otoczeniu próbki, niejednorodności izolacji z pianki PUR (rozrzut gęstości pozornej powyżej $\pm 10 \text{ kg/m}^3$, obecność pustek powietrznych) oraz niewspółosiowości rury przewodowej względem osłony.

Moc osiągnięta w **stanie ustalonym**⁸ podczas cyklu pomiarowego⁹ jest wyznaczana z pomiarów spadku napięcia na nagrzewnicy głównej oraz natężenia prądu określonego na podstawie spadku napięcia na oporniku wzorcowym. Opornik wzorcowy jest elementem umieszczonym szeregowo w układzie grzewczym. Pomijane są spadki napięcia na pozostałych elementach układu grzewczego (np. przewodach, złączach gwintowych).

Bezpośredni pomiar napięcia oraz zastosowanie grzałek kompensacyjnych eliminujących osiowy strumień ciepła pozwala na zminimalizowanie liczby zmiennych wpływających na wynik badania i uzyskanie **niepewności tego wyniku rzędu 0,0001 W/(m·K)**.

Wynik badania przewodności cieplnej należy uznać za prawidłowy, jeżeli podczas pomiarów temperatury i mocy w jednym cyklu pomiarowym zachowane są kryteria stanu ustalonego:

- zmienność temperatury powietrza otaczającego odcinek pomiarowy rury badawczej: max. $\pm 1\text{K}$ (Tabela 1, p. 3), max. $\pm 1^\circ\text{C}$ (Tabela 1, p. 4),
- udział osiowego strumienia ciepła w całkowitym strumieniu ciepła uzyskanym od nagrzewnicy głównej: max. 1% (Tabela 1, p. 15), max. 0,5% (Tabela 1, p. 16)
- różnica między pojedynczymi pomiarami a średnią z co najmniej 3 szeregów serii pomiarów (temperatury powierzchni odcinka pomiarowego rury badawczej oraz strumienia ciepła): max. 1% (Tabela 1, p. 21, 22).

Warunki i metoda prowadzenia badań

Na etapie uzgodnień ze zleceniodawcą ustalona zostaje wartość średniej temperatury t_m (zależnej od przeznaczenia wyrobu), dla której wyznaczana będzie przewodność cieplna izolacji λ_{tm} .

Badanie wykonywane jest w minimum trzech cyklach pomiarowych tak dobranych, aby średnie temperatury izolacji t_{mi} w każdym cyklu pomiarowym oscylowały wokół wartości t_m . Każdy cykl pomiarowy prowadzony jest przy innej wartości temperatury rury badawczej T_{1i} .

W wyniku przeprowadzenia jednego cyklu pomiarowego obliczona zostaje przewodność cieplna ($\lambda_{m,i}$) w średniej temperaturze izolacji ($t_{m,i}$).

Wynik badania przewodności cieplnej izolacji λ_{tm} w średniej temperaturze t_m jest obliczany z równania linii trendu o współczynniku korelacji $r \geq 0,95$ – wyznaczającej ogólny kierunek i tendencję w zbiorze n danych $\lambda_{m,i}, t_{m,i}$.

W przypadku rur preizolowanych stosowanych w ciepłownictwie przewodność cieplną

⁸ stan ustalony – niezmiennosc wielkości w czasie. W przypadku badania przewodności cieplnej na aparacie rurowym odchylenie wartości minimalnej oraz maksymalnej od wartości średniej w jednym cyklu pomiarowym $< 1\%$

⁹ cykl pomiarowy – 3 szeregi pomiarowe realizowane w odstępach co 0,5 godz., przy tej samej temperaturze rury badawczej

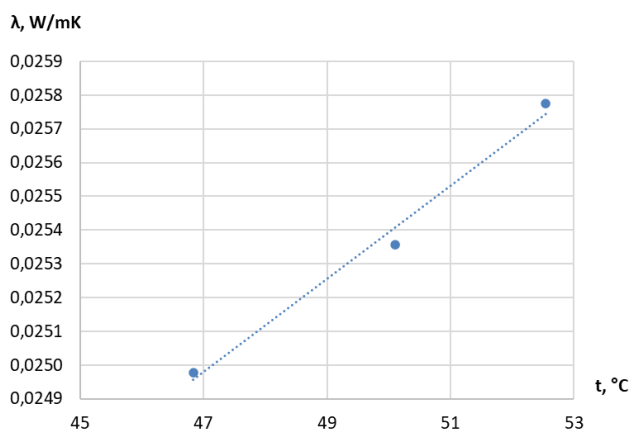
wyznacza się metodą regresji liniowej dla średniej temperatury izolacji 50°C, przy założonych temperaturach rury badawczej: 70°C, 80°C i 90°C.

Raportowanie danych

Zapisy z przebiegu badania przewodności cieplnej oraz wyniki obliczeń rejestrowane są na bieżąco w oprogramowaniu stanowiskowym i archiwizowane w formie plików w pamięci komputera obsługującego aparat rurowy. Na podstawie zapisów z pojedynczych pomiarów sprawdzane są kryteria stanu ustalonego.

Wynik badania przewodności cieplnej prezentowany jest w postaci:

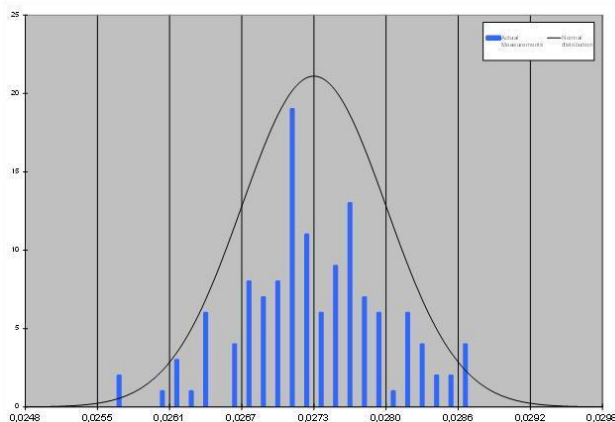
- zależności pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła i średnią temperaturą izolacji przedstawioną w formie graficznej oraz w postaci wzoru matematycznego $\lambda_{tm} = f(t_m)$ (Rysunek 8),
- wartości przewodności cieplnej wyznaczonej z funkcji $\lambda_{tm} = f(t_m)$ z rozszerzoną niepewnością przy poziomie



$$\lambda = 0,000138 \cdot t + 0,018479; \text{współczynnik korelacji } r = 0,99$$

$$\lambda_{50} = (0,0254 \pm 0,0007) \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Rysunek 8. Przykład raportowania wyników badania przewodności cieplnej. Źródło: opracowanie własne
Figure 8. Example of reporting thermal conductivity test results. Source: author's own study



Rysunek 9. Współczynnik przewodzenia ciepła izolacji w rurach preizolowanych wyprodukowanych metodą tradycyjną (Kręcielewska & Iwko, 2021). Rozkład normalny $\lambda_{50, \text{sr}} = 0,0273$ (0,028) W/(m · K), $\lambda_{50, \text{min}} = 0,0256$ (0,026) W/(m · K), $\lambda_{50, \text{max}} = 0,0286$ (0,029) W/(m · K)

Figure 9. Thermal conductivity of the insulation in pre-insulated pipes manufactured using the traditional method (Kręcielewska & Iwko, 2021). Normal distribution $\lambda_{50, \text{sr}} = 0,0273$ (0,028) W/(m · K), $\lambda_{50, \text{min}} = 0,0256$ (0,026) W/(m · K), $\lambda_{50, \text{max}} = 0,0286$ (0,029) W/(m · K)

ufności 95% i współczynnika rozszerzenia $k = 2$ (Rysunek 8).

W przypadku zespołów preizolowanych funkcja $\lambda_{tm} = f(t_m)$ jest funkcją liniową (PKN, 2024). W przypadku badań typu rur preizolowanych przewodność cieplna λ_{tm} określana jest jako średnia z wyników badań trzech różnych zespołów rur.

Wiarygodność wyników pomiarów przewodności cieplnej rur preizolowanych

Statystyka

Pojedynczy pomiar współczynnika przewodzenia ciepła seryjnie produkowanych rur preizolowanych ma charakter losowy i nie jest reprezentatywny dla całej grupy wyrobów¹⁰.

Z tego względu rzetelna ocena nie powinna opierać się na jednostkowym badaniu, lecz na analizie statystycznej rozkładu normalnego (Gausa).

Na Rysunku 9 przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych w latach 2007 ÷ 2021 zespołów rurowych z izolacją z tego samego systemu surowcowego (Kręcielewska & Iwko, 2021).

Wyniki poszczególnych badań zawarte są w przedziale (0,026 ÷ 0,029) W/(m · K), czyli deklarowana w KDWU¹¹ przewodność cieplna grupy wyrobów powinna wynosić $\lambda_{50} = 0,029$ W/(m · K), mimo tego, że reprezentatywną dla tej grupy wyrobów jest wartość zlokalizowana w centrum rozkładu normalnego $\lambda_{50, \text{sr}} = 0,027$ W/(m · K).

Jest to szczególnie istotne dla producentów rur preizolowanych, którzy deklarując przewodność cieplną każdej partii wyrobów, powinni uwzględnić naturalny rozrzut wyników badań zgodny z rozkładem normalnym (Gausa).

Natomiast dla inwestora kluczowa jest świadomość, że podany w sprawozdaniu z badań wynik przewodności cieplnej nie jest reprezentatywny dla grupy wyrobów.

Nadzór metrologiczny

Wiarygodność i ważność wyników badań przewodności cieplnej w Laboratorium Badawczym Veolia Energia Warszawa S.A opiera się na ścisłym nadzorze metrologicznym nad aparaturą oraz na budowaniu realnego budżetu niepewności dla każdego pomiaru.

Wszystkie przyrządy pomiarowe – w tym multimetry cyfrowe, precyzyjny bocznik prądowy, sieć czujników wraz z aparaturą pomiarowo-regulacyjną oraz narzędzia do pomiarów wymiarów geometrycznych – są cyklicznie wzorcowane w państwowych instytutach i akredytowanych laboratoriach. Zapewnia to pełną spójność pomiarową z międzynarodowymi wzorcami jednostek miar oraz kontrolę nad stabilnością i powtarzalnością urządzeń.

Dokładne wartości błędów pomiarowych oraz niepewności, odczytywane bezpośrednio z aktualnych świadectw wzorcowania przyrządów, są każdorazowo wprowadzane do końcowych obliczeń budżetu niepewności. Ponadto, aby wyeliminować błędy losowe, podczas każdego badania wymiarów geometrycznych wykonuje się od kilku do kilkunastu powtórzeń. Jako ostateczną niepewność poda-

¹⁰ grupa wyrobów – rury preizolowane wyprodukowane tą samą metodą, przez jednego producenta, z izolacją z takiego samego systemu surowcowego

¹¹ KDWU – krajowa deklaracja właściwości użytkowych

waną w sprawozdaniu z badań zawsze przyjmuje się wartość maksymalną z obliczonych niepewności cząstkowych ze wszystkich cykli pomiarowych, co skutecznie chroni proces przed ryzykiem jej zaniżenia. Takie ścisłe powiązanie dokładności sprzętu z budżetem niepewności¹² pozwala na zminimalizowanie liczby zmiennych i uzyskanie niepewność wyniku współczynnika przewodzenia ciepła rzędu 0,0001 W/(m·K).

Potwierdzenie ważności wyników poprzez międzynarodowe badania biegłości

Niezależnym i najbardziej obiektywnym dowodem na wiarygodność stosowanych metod badawczych jest regularny udział laboratorium w badaniach biegłości lub porównaniach międzylaboratoryjnych (PT/ILC). Laboratoria akredytowane mają obowiązek cyklicznie brać udział w takich programach (PKN, 2018). Porównania te polegają na badaniu tych samych wyrobów przez dwa lub więcej laboratoria.

Uzyskane wyniki następnie są wspólnie zestawiane przez jednostkę koordynującą. W celu oceny wyników uzyskiwanych przez poszczególne laboratoria stosuje się metody statystyczne (PCA, 2023; PO-12, 2025). Analiza ta opiera się przede wszystkim na wyznaczaniu wartości przypisanej np. średniej arytmetycznej dla całej grupy wyników oraz określaniu ich rozrzutu, czyli różnicy między skrajną wartością minimalną a maksymalną. W celu eliminacji wartości skrajnych, wynikających na przykład z awarii sprzętu lub błędów obliczeniowych, wykorzystuje się test Grubbsa¹³. Natomiast stopień rozbieżności wyników wokół średniej z pomiarów opisuje się za pomocą odchylenia standardowego, które pokazuje, jak blisko średniej skupiają się wyniki poszczególnych uczestników.

Dodatkowo, zgodnie z aktualnymi wytycznymi akredytacyjnymi (PCA, 2023; PO-12, 2025), jako główne narzędzie oceny biegłości stosuje się wskaźnik przesunięcia statystycznego (Z-score) wyniku danego laboratorium od średniej wszystkich uczestników. Zgodnie z wymaganiami, interpretacja tego wskaźnika jest następująca:

- wartość mieszcząca się w przedziale **od -2 do 2** oznacza wynik w pełni zadowalający, co potwierdza prawidłowe działanie aparatury pomiarowej oraz brak stałych odchylek systematycznych,
- wartości wykraczające poza przedział **od -3 do 3** oznaczają wyniki niezadowalające, co stanowi dla laboratorium sygnał o wystąpieniu anomalii i informuje o konieczności wdrożenia wewnętrznych procedur sprawdzających oraz działań naprawczych.

Wymagania normatywne są konsekwencją wniosków formułowanych na bazie kolejnych europejskich programów PT/ILC. Analizie poddano trzy kluczowe programy badań biegłości i porównań międzylaboratoryjnych:

1. Program "Round Robin Test for Measuring of Thermal Conductivity in Preinsulated Pipes LAMBDA" zainicjowany przez grupę roboczą CEN/TC 107/WG3 i zorga-

nizowany w 1997 roku przez Danish Technological Institute Centre for District Heating (DTI, 1997). Udział w nim wzięło 11 europejskich laboratoriów, każde z nich otrzymało po 4 rury preizolowane DN50 wyprodukowane metodą conti. Pierwsze porównania pokazały brak spójności metodologicznej badania przewodności cieplnej na rynku europejskim. W programie stwierdzono, że laboratoria stosowały:

- różne metody badawcze (EN 253, ISO 8497, DIN 52613, ASTM C335, metody własne),
 - różne konstrukcje aparatów,
 - skrajnie odmienne długości próbek (od 0,6 m do 5 m).
- Tylko 5 laboratoriów stosowało w pełni wzorcowane urządzenia, połowa z całej grupy zaraportowała wynik dla izolacji, reszta dla całego zespołu rurowego.

Zaowocowało to szerokim rozrzutem wartości wyników przewodności cieplnej w średniej temperaturze 50°C w przedziale (0,0268 ÷ 0,0372) W/(m·K). Różnica między skrajnymi odczytami wyniosła 0,0104 W/(m·K). Zgromadzone dane stały się podstawą do opracowania istotnych zmian do kolejnej edycji EN 253 (PKN, 2024).

2. Program "Lambda 3" (2006 r.) (DTI, 2006). W tej edycji wzięła udział grupa 6 wiodących laboratoriów europejskich, w tym Laboratorium Badawcze ówczesznie należące do OBRC SPEC. Średnia wartość przewodności cieplnej izolacji dla całej grupy uczestników wyniosła 0,0246 W/(m·K). Dzięki wprowadzeniu jednolitych procedur opartych na nowej edycji EN 253 (PKN, 2005) rozrzut skrajnych wartości uległ znacznemu zawężeniu i wyniósł 0,0018 W/(m·K), przy odchyleniu standardowym na poziomie zaledwie 0,00064 W/(m·K). Laboratorium Badawcze Veolia Energia Warszawa S.A. uzyskało zadowalający wynik **0,0249 W/(m·K)**, oddalony od średniej o **0,0003 W/(m·K)**. Przełożyło się to na bardzo niski wskaźnik Z-score równy 0,37. Badania były prowadzone na trzech typach aparatów rurowych.

3. Program "Lambda IV" zorganizowany w 2014 roku, koordynowany bezpośrednio przez grupę roboczą CEN/TC 107/WG3 (CEN/TC 107, 2014). W programie uczestniczyło 7 instytutów i akredytowanych laboratoriów. Obiektem badań były rury preizolowane DN50 wyprodukowano metodą conti z barierą dyfuzyjną (w celu zminimalizowania procesu starzenia w okresie między produkcją, a badaniem przewodności cieplnej). Po wykluczeniu testem Grubbsa jednego wyniku odstającego $\lambda_{50} = 0,021$ W/(m·K), średnia arytmetyczna przewodności cieplnej dla pozostałych uczestników wyniosła 0,0272 W/(m·K). Uzyskane dane mieściły się w przedziale **(0,0263 ± 0,0280) W/(m·K)**, przy bardzo małym odchyleniu standardowym wynoszącym zaledwie ± 0,0004 W/(m·K). Laboratorium Badawcze Veolia Energia Warszawa S.A. uzyskało wynik **0,0275 W/(m·K)** oddalony od średniej o 0,0003 W/(m·K), co dało satysfakcjonujący wskaźnik Z-score równy 0,75.

Twarde dane z programów PT/ILC dowodzą, że przy pełnym spełnieniu wymagań normatywnych wyniki wiodących laboratoriów europejskich wykazują bardzo wysoką zbieżność, a naturalny rozrzut statystyczny mierzony odchyleniem standardowym wynosi około ±0,0004 W/(m·K).

¹² budżet niepewności – zestawienie wszystkich potencjalnych źródeł błędów wpływających na pomiar (np. dokładność czujników, wahania temperatury czy geometria próbek). Przez oszacowanie każdego z tych czynników osobno i ich matematyczne połączenie określa się całkowitą niepewność, czyli wiarygodny przedział, w którym leży rzeczywista wartość badanego parametru

¹³ test statystyczny służący do wykrywania obserwacji odstających danych pochodzących z populacji o zakładanym rozkładzie normalnym

W praktyce inżynierskiej i obrocie rynkowym wyrobów preizolowanych spotyka się jednak niekiedy większe różnice wyników badań przewodności cieplnej rur preizolowanych wyprodukowanych tą samą metodą, sięgające nawet 10%. Jak wykazała analiza wyników badań biegłości laboratoria mierzą spójnie. Pytanie: skąd biorą się te rynkowe rozbieżności? Przyczyną różnic mogą być odmienne warunki prowadzenia badań, nie doprecyzowane w normach badawczych oraz stan badanego obiektu:

- transport ciepła w sztywnej piance PUR w znacznej mierze zależy od składu mieszaniny gazów zamkniętych w jej komórkach. Warto pamiętać, że bezpośrednio po wyjściu rury z linii produkcyjnej w materiale wciąż zachodzi końcowy proces polimeryzacji. Równoległe z tym procesem zachodzi powolna dyfuzja gazów, – bezpośrednio po produkcji komórki zawierają czynniki porotwórcze: min. cyklopentan o bardzo niskiej przewodności oraz dwutlenek węgla. Z upływem czasu porofory częściowo dyfundują na zewnątrz, a do komórek pianki wnika powietrze (azot i tlen), co naturalnie podwyższa wartość przewodności cieplnej. Z tego powodu PN-EN 253 określa czas i stabilne warunki kondycjonowania wyrobów (czas 5 ± 1 tydz., temperatura $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$) przed rozpoczęciem badań typu. Dopiero po zakończeniu reakcji chemicznych i wstępnym ustaleniu się równowagi gazowej próbka osiąga stabilne i reprezentatywne właściwości izolacyjne. Porównywanie wyników rur zbadanych bezpośrednio po procesie produkcyjnym z wyrobami, które przeszły pełny cykl stabilizacji wykaże istotne różnice, niezależnie od dokładności samej aparatury pomiarowej,
- normy EN 253 i ISO 8497 dopuszczają różne metody minimalizowania osiowego przepływu ciepła na końcach rury badawczej. Aparat z podgrzewanymi końcami (Guarded ends) fizycznie zeruje te straty, dając rzeczywisty wynik przewodności cieplnej, niewymagający korygowania. Z kolei oparcie wyznaczania przewodności cieplnej na matematycznych korektach obliczeniowych (np. przy użyciu klasycznej poprawki van Rinsuma) wprowadza do algorytmu dodatkowe założenia teoretyczne. Choć obie metody są normatywnie akceptowalne, różnice w podejściu mogą powodować różnice w wynikach przewodności cieplnej,
- rozmieszczenie większej (niż wymagane minimum) liczby czujników temperatury pozwala na dokładniejsze uśrednienie rozkładu temperatury na całej długości i obwodzie badanej próbki. Zastosowanie gęstej matrycy pomiarowej zmniejsza wpływ zmiennej struktury, takich jak np. nieosiowość zespołu rurowego czy lokalne różnice gęstości pianki. W przypadku stosowania układów opartych wyłącznie na wymaganym przez normy minimum czterech czujników, wyznaczany współczynnik przewodzenia ciepła staje się w większym stopniu podatny na losowy wpływ tych miejscowych wahań.

Podsumowanie

1. Prowadzone od ponad 30 lat w Laboratorium Badawczym Veolia Energia Warszawa S.A. badania wyrobów izolacyjnych stanowią podstawę wiarygodnej oceny właściwości termoizolacyjnych rurociągów. Długoletnie doświadczenie, poparte od 2003 roku akredytacją

PCA oraz od 2009 roku rekomendacją EuroHeat&Power (EHP), stanowi fundament rygorystycznych procedur badawczych.

2. Kluczowym czynnikiem eliminującym błędy systematyczne pomiaru jest wybór aparatu rurowego z niezależnymi ogrzewanymi segmentami na końcach rury badawczej (typ Guarded End Apparatus). Pozwala to na utrzymanie zerowego gradientu temperatury i fizyczne wyeliminowanie osiowego przepływu ciepła, dając bezpośredni wynik przewodności cieplnej niewymagający stosowania poprawek obliczeniowych oraz dodatkowych założeń teoretycznych, co ma miejsce w przypadku aparatów z kalibrowanymi i obliczanymi końcami.
3. Wysoką precyzję pomiaru temperatury rury badawczej w Laboratorium Badawczym Veolia Energia Warszawa S.A. uzyskuje się poprzez utrzymywanie w niej próżni w celu wyeliminowania zjawiska konwekcji oraz bezpośredni pomiar spadku napięcia na nagrzewnicy głównej i oporniku wzorcowym, z pominięciem spadków napięć na pozostałych elementach układu grzewczego.
4. Wykonując badanie przy zastosowaniu wymaganej przez normy minimalnej liczby czterech czujników temperatury na powierzchni próbki sprawia, że wyznaczany współczynnik przewodzenia ciepła staje się bardziej podatny na losowy wpływ lokalnych niejednorodności pianki PUR oraz niewspółosiowości zespołu rurowego. Zastosowany w Laboratorium Badawczym Veolia Energia Warszawa S.A. rozbudowany układ termoelementów niweluje te wpływy, a w konsekwencji wartość współczynnika przewodzenia ciepła wyrobu jest bardziej reprezentatywna.
5. Wiarygodność budżetu niepewności badania przewodności cieplnej opiera się na cyklicznym wzorcowaniu aparatury w akredytowanych laboratoriach oraz wykonywaniu wielokrotnych powtórzeń pomiarów geometrycznych. Do końcowego sprawozdania przyjmuje się zawsze maksymalną wartość niepewności obliczoną dla poszczególnych cykli, co skutecznie zapobiega jej zaniżeniu. Właściwy nadzór metrologiczny oraz zastosowane rozwiązania eliminujące wpływ niejednorodności pianki, osiowego przepływu i konwekcji ciepła umożliwiają osiągnięcie bardzo niskiej niepewności pomiaru rzędu $0,0001 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
6. W celu umożliwienia weryfikacji i przeprowadzenia rzetelnej oceny porównawczej wyników badań z różnych laboratoriów, sprawozdanie z badań powinno zawierać m.in. warunki badania, warunki kondycjonowania, wyniki pomiarów temperatury i strumienia ciepła, właściwości pianki (gęstość, wytrzymałość na ściskanie, wymiar komórki i skład gazów), wymiary geometryczne próbki, a w przypadku aparatów z obliczonymi/ wzorcowanymi końcami rury, wartości stosowanych korekt.
7. Na poprawność wyniku przewodności cieplnej rur preizolowanych istotnie wpływa stan fizyczny badanej pianki PUR, ponieważ transport ciepła w materiale zależy w znacznej mierze od składu mieszaniny gazów zamkniętych w jej komórkach. Prowadzenie badań bezpośrednio po produkcji, z pominięciem normatywnego czasu kondycjonowania (np. 5 ± 1 tygodni dla ba-

dań typu), skutkuje uzyskaniem zaniżonych wartości przewodności cieplnej, gdyż w materiale nie zakończył się etap "stabilizacji pianki".

8. Pojedynczy wynik pomiaru przewodności cieplnej nie jest reprezentatywny całej grupy wyrobów. Producenci powinni określać parametry wyrobów z uwzględnieniem ich naturalnego rozrzutu statystycznego, a inwestorzy muszą mieć świadomość, że jednostkowe dane ze sprawozdania nie odzwierciedlają właściwości całej partii rur.
9. W przypadku rur preizolowanych wyprodukowanych metodą tradycyjną, deklarowana w KDWU przewodność cieplna $\lambda_{50} = 0,029 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ jest realna i bezpieczna do obliczeń strat ciepła nowych rurociągów¹⁴.
10. Niezależnym i obiektywnym potwierdzeniem wiarygodności stosowanych przez jednostki badawcze metod jest regularny udział w międzynarodowych badaniach biegłości (PT/ILC). Uzyskane przez Laboratorium Badawcze Veolia Energia Warszawa S.A. wartości wskaźnika Z-score (0,37 w programie "Lambda 3" oraz 0,75 w programie "Lambda IV") potwierdzają wysoką dokładność i spójność pomiarową oraz kompetencje LB w badaniu przewodności cieplnej rur preizolowanych.
11. Mimo wysokiej spójności wyników przewodności cieplnej, uzyskanych przez laboratoria w badaniach biegłości, w codziennej praktyce inżynierskiej i obrocie rynkowym spotyka się rozbieżności wyników badań przewodności cieplnej wyrobów z tej samej grupy, sięgające nawet do 10%. Przyczyną różnic mogą być odmienne procedury prowadzenia badań. Niższe wyniki nie powinny być zatem bezkrytycznie uznawane za dowód wyższej jakości izolacji.

Bibliografia

- ASTM. (1995). ASTM C335-95 Standard Test Method for Steady-State Heat Transfer Properties of Horizontal Pipe Insulation. *Advancing Standards Transforming Markets International*.
- CEN/TC 107. (2014). Round Robin Initial Lambda Measurement on Pre-insulated Pipes DN50 (Lambda IV) [Nieopublikowany raport z porównań międzylaboratoryjnych przekazany uczestnikom programu]. *CEN Technical Committee 107*
- CEN. (1996). EN ISO 8497:1996 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes. *European Committee for Standardization*.
- DTI. (1997). Round Robin Test for Measuring of Thermal Conductivity in Preinsulated Pipes: Acronym LAMBDA (NORD-TEST Project No. 1331-97). *Danish Technological Institute Centre for District Heating*. <https://www.osti.gov/etde->

[web/servlets/purl/332818](https://www.osti.gov/etde-web/servlets/purl/332818) (Dostęp: 24.06.2026)

- DTI. (2006). Results of Tests RRT DTI 2006: Program Lambda 3 [Niepublikowany raport z badań biegłości przekazany uczestnikom programu]. *Danish Technological Institute*.
- ISO. (1994). ISO 8497:1994 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes. *International Organization for Standardization*.
- Kręcielewska, E., & Iwko, I. (2021). Fakty i mity dotyczące rur preizolowanych stosowanych w ciepłownictwie – Część I. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 52(12), 17–25. <https://doi.org/10.15199/9.2021.12.3>
- PKN. (1993). PN-EN 253:1993 System preizolowanych rur do podziemnych wodnych sieci ciepłowniczych. Zespół rurowy ze stalowej rury przewodowej, izolacji cieplnej z poliuretanu i płaszcza osłonowego z polietylenu wysokiej gęstości. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (1999). PN-EN 253:1999 System preizolowanych rur do podziemnych wodnych sieci ciepłowniczych – Zespół rurowy ze stalowej rury przewodowej, izolacji cieplnej z poliuretanu i płaszcza osłonowego z polietylenu. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (1999). PN-EN ISO 8497:1999 Izolacja cieplna – Określanie właściwości w zakresie przepływu ciepła w stanie ustalonym przez izolacje cieplne przewodów rurowych. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2005). PN-EN 253:2005 Sieci ciepłownicze – System preizolowanych zespolonych rur do wodnych sieci ciepłowniczych układanych bezpośrednio w gruncie – Zespół rurowy ze stalowej rury przewodowej, izolacji cieplnej z poliuretanu i płaszcza osłonowego z polietylenu. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2018). PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2020). PN-EN 17248:2020-01 Sieci ciepłownicze i sieci chłodzenia zdalaczynnego – Terminy i definicje. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2022). PN-EN ISO 12241:2022-12 Izolacja cieplna wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych - Zasady obliczania. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- 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*.
- PCA. (2023). DA-05 Polityka dotycząca uczestnictwa w badaniach biegłości lub porównaniach międzylaboratoryjnych innych niż badania biegłości. *Polskie Centrum Akredytacji*
- PO-12. (2025). Procedura ogólna "Projektowanie i rozwijanie usług badawczych". [Procedura wewnętrzna LB]

¹⁴ wartość przewodności cieplnej izolacji zmienia się w czasie eksploatacji

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.*