

7-8/2026

lipiec
sierpień

ISSN 0137-3676

e-ISSN 2449-9900

tom 57 (7-8)

Cena: 37,00 zł
(w tym VAT 8%)

C O W

CIEPŁOWNICTWO OGRZEWNICTWO WENTYLACJA



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

DISTRICT HEATING • HEATING • VENTILATION

Wydawane od 1969 roku

Wilo-Stratos GIGA 30-55 kW



wilo

- **Moc 30-55 kW** – do dużych instalacji grzewczych i chłodniczych
- **Przyłącza DN100-DN200** – rozwiązanie dla zwiększonych przepływów
- **Silniki klasy IE5** – najwyższa klasa efektywności energetycznej
- **Nabudowana przetwornica Wilo-EFC** – kompletna pompa z regulacją
- **Regulacja n-const i PID** – praca dostosowana do instalacji
- **Współpraca 2-3 pomp** – praca równoległa lub kaskadowa
- **Komunikacja z BMS** – zdalny dostęp do parametrów pracy pompy
- **Medium od -20°C do +140°C** – szeroki zakres zastosowań
- **Opcja „back pull-out”** – łatwiejsza obsługa serwisowa

IE5

NOWOŚĆ

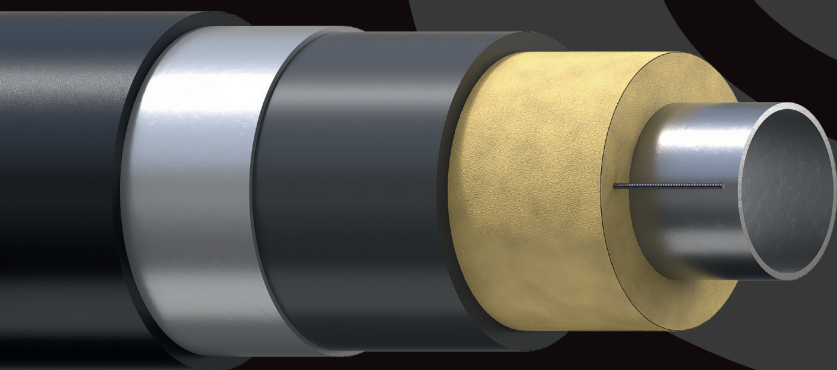


EVOprotect

**Systemy rurowe
z innowacyjną
barierą dyfuzyjną**

**RADPOL
PIPES**

EVOprotect® zmniejsza
straty przesyłowe ciepła
nawet o **12% w ciągu
pierwszych 10 lat**
eksploatacji i utrzymuje
stabilną przewodność cieplną.



**RADPOL PIPES
GREENID**

**Systemy rur preizolowanych
z płaszczem HDPE wytwarzanym
z granulatu pochodzącego
z recyklingu własnego.**

Redukuje emisję **CO₂** nawet
o **1,5 tony** na każdą tonę
zastosowanego HDPE w porównaniu
z granulem pierwotnym.



SPEŁNIA WYMOGI
EN 253



**TOP
QUALITY
IN EVERY
LAYER.**



Dowiedz się więcej na www.radpolpipes.eu

ZAWORY KULOWE BROEN BALLOMAX®

Efektywne energetycznie zawory tworzone z myślą o zrównoważonym rozwoju, niezawodności i najwyższych standardach jakościowych.



BROEN
BALLOMAX®

Designed to last

**SPOTKAJMY SIĘ NA
FORUM CIEPŁOWNIKÓW
POLSKICH**

13-16 września 2026

Międzyzdroje

ZAWORY KULOWE BROEN BALLOMAX®

DN 15 - 1000

PN 16, 25, 40

Pełen przełot | Zredukowany przełot

Kula pływająca | Kula jarzmiona

PRZEPUSTNICE POTRÓJNIE MIMOŚRODOWE

DN 80 - 2000

PN 25/16, PN 25/25

ciepło systemowe | chłodnictwo | instalacje przemysłowe

Szanowni Czytelnicy,

oddajemy w Państwa ręce wakacyjny, podwójny numer czasopisma „Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja”. Zebrane w nim artykuły łączy poszukiwanie rozwiązań, które pozwalają zwiększać efektywność energetyczną, ograniczać wpływ instalacji na środowisko, a jednocześnie zapewniać bezpieczeństwo ich użytkowania i niezawodność działania.

Numer otwiera artykuł Ewy Kręcielewskiej, Iwony Mazurkiewicz i Katarzyny Omen-Mizerskiej poświęcony badaniom przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych. Autorki pokazują, jak na wiarygodność wyników wpływają procedury laboratoryjne, konstrukcja aparatury, przygotowanie próbek oraz właściwości pianki PUR. Zagadnienie to ma istotne znaczenie dla prawidłowej oceny jakości rur preizolowanych i rzeczywistych strat ciepła w sieciach.

Efektywność energetyczna jest również tematem studium przypadku autorstwa Sylwii Szczęśniak i Agnieszki Grabki, dotyczącego sterowania temperaturą powietrza w sali widowiskowej. Autorki analizują wpływ różnych strategii regulacji, strumienia powietrza wentylacyjnego, frekwencji oraz pionowego gradientu temperatury na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, chłodzenia i transportu powietrza.

W kolejnym artykule Ireneusz Bauma podejmuje temat dekarbonizacji systemów grzewczych, analizując możliwość zastąpienia grzałki elektrycznej źródłem biomasy w układzie z pompą ciepła. Przedstawia zalety i ograniczenia takiego rozwiązania, zwracając uwagę na konieczność właściwego doboru źródeł oraz uwzględnienia lokalnych warunków technicznych i ekonomicznych.

W numerze znajdują Państwo także opracowanie Andrzeja Obmińskiego dotyczące przenikania włókien azbestu z powietrza zewnętrznego do wnętrza użytkowanych budynków podczas demontażu elewacji azbestowo-cementowych. Wyniki badań wskazują na znaczenie odpowiedniej organizacji prac oraz skutecznej ochrony użytkowników obiektów.

Istotny głos w dyskusji o jakości obliczeń energetycznych stanowi artykuł Piotra Michalaka poświęcony błędom w normie PN-EN ISO 52010-1. Autor analizuje ich wpływ na godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni o różnej orientacji i nachyleniu, wykazując, że rozbieżności mogą przekładać się na wyniki oceny charakterystyki energetycznej budynków.

Interesujące połączenie nauki z praktyką przynosi artykuł Edwarda Bramsona i Renaty Sulimy, przedstawiający autorską metodę doboru pomp ciepła do modułowych budynków dworców kolejowych w różnych strefach klimatycznych Polski. Opracowany algorytm uwzględnia zarówno zapotrzebowanie na ciepło i warunki klimatyczne, jak i rzeczywiste parametry pracy urządzeń.

Część naukową zamyka studium Wojciecha Orzecha, Jacka Mazura i Bożeny Babiarcz dotyczące systemu ciepłowniczego Rzeszowa oraz ochrony infrastruktury, bezpieczeństwa i niezawodności dostaw ciepła w warunkach transformacji energetycznej. Autorzy podkreślają, że modernizacja ciepłownictwa powinna uwzględniać bezwładność hydrauliczną i termodynamiczną systemów oraz być poprzedzona rzetelnymi analizami technicznymi.

W części praktycznej polecamy artykuł Grzegorza Sypka dotyczący zapobiegania zadymieniu przedsionków prze-



ciwpożarowych. Autor wskazuje, jak już na etapie koncepcji projektowej uniknąć późniejszych problemów eksploatacyjnych.

Grzegorz Grzyb, Andrzej Misiewicz i Jacek Murawski przedstawiają natomiast efekty modernizacji układu pompowego Ciepłowni Malbork. Opisanie rozwiązania pokazuje, że właściwy dobór pomp, przebudowa układu technologicznego oraz zmiany w sposobie sterowania mogą przynieść wymierne oszczędności energii.

Część praktyczną uzupełnia artykuł Romana Krzywdy i Bogumiły Wrzesińskiej poświęcony zasadności stosowania bariery dyfuzyjnej w rurach preizolowanych. Auto-

rzy analizują jej wpływ na zachowanie właściwości izolacyjnych pianki PUR oraz ograniczenie strat ciepła, kosztów eksploatacyjnych i oddziaływania sieci na środowisko.

W dziale prawnym Andrzej Falkowski omawia zagadnienie okresowych kontroli przewodów kominowych, zwracając uwagę na wątpliwości interpretacyjne związane z kontrolą instalacji wentylacji mechanicznej. Zamieszczamy również materiał informacyjny dotyczący zmian w programie „Czyste Powietrze”, które ułatwiają dostęp do dotacji i wydłużają czas realizacji części inwestycji. Numer uzupełniają zapowiedzi najważniejszych wydarzeń branżowych najbliższych miesięcy.

Życzymy Państwu interesującej i inspirującej lektury!

Anna Bogdan

Odwiedź nową stronę czasopisma

cieplownictwoogrzewnictwowedylacja.pl



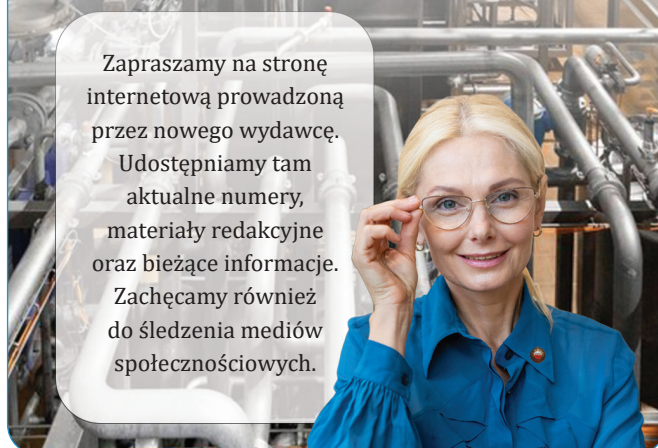
oraz nowe media społecznościowe:

- www.facebook.com/COW.PZITS
- www.linkedin.com/company/cow-
- [cieplownictwo-ogrzewnictwo-wentylacja](https://www.instagram.com/cieplownictwo-ogrzewnictwo-wentylacja)

Zapraszamy na stronę internetową prowadzoną przez nowego wydawcę.

Udostępniamy tam aktualne numery, materiały redakcyjne oraz bieżące informacje.

Zachęcamy również do śledzenia mediów społecznościowych.



KOLEGIUM REDAKCYJNE/Editorial Board

REDAKTOR NACZELNY/Editor in Chief

dr hab. inż. Anna Bogdan, prof. PW

**REDAKTORZY TEMATYCZNI/Subject Editors
Ciepłownictwo/District heating**

- dr hab. inż. Bożena Babiarz, prof. PRz
- mgr inż. Ewa Kręcielewska
- mgr inż. Barbara Rubik
- prof. dr hab. inż. Robert Sekret

**Chłodnictwo i pompy ciepła/Refrigeration
and heat pumps**

- mgr inż. Paweł Lachman
- dr inż. Marian Rubik
- dr inż. Piotr Ziętek

Jakość powietrza/Air quality

- dr hab. inż. Robert Cichowicz, prof. PŁ

**Wentylacja, klimatyzacja, ogrzewnictwo/
Ventilation, air conditioning, heating**

- dr hab. inż. Tomasz Cholewa, prof. PL
- dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ
- dr inż. Andrzej Górka
- mgr inż. Wojciech Ratajczak
- dr inż. Sylwia Szczęśniak
- dr hab. inż. Ewa Zender-Świercz, prof. PŚk

**WYDAWNICTWO POLSKIEGO ZRZESZENIA
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH**

ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

tel: 22 826 28 94

e-mail: wydawnictwo@pzits.pl, www.pzits.pl

Szczegóły prenumeraty:

www.pzits.pl/prenumerata

ADRES REDAKCJI

ul. Czackiego 3/5 pokój 217

00-043 Warszawa

redakcja@cieplownictwoogrzewnictwowentylacja.pl

www.cieplownictwoogrzewnictwowentylacja.pl

SKŁAD I OPRACOWANIE GRAFICZNE

Agnieszka Chojnacka

Polskie Zrzeszenie Inżynierów

i Techników Sanitarnych

DRUK

Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwo

SIGMA-NOT Sp. z o. o.

ul. Ks. J. Popiełuszki 19/21, 01-595 Warszawa

Miejsce i data wydania: Warszawa 08/2026

Nakład: 260 egzemplarzy

INFORMACJE DODATKOWE

Czasopismo znajduje się w wykazie czasopism
naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa
Wyższego.

Czasopismo jest indeksowane w: BazTech,
EBSCO, Index Copernicus ICV 2024 = 75.74
oraz w Polskiej Bibliografii Naukowej (PBN),
będącej częścią Zintegrowanego Systemu
Informacji o Szkolnictwie Wyższym i Nauce
POL-on. Artykuły są rejestrowane w bazie
danych CrossRef. Każdy artykuł ma numer
identyfikacyjny DOI.

Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść ogłoszeń.

Anna Bogdan – Na pierwszy rzut oka.....	2
Nauka i Technika	
Ewa Kręcielewska, Iwona Mazurkiewicz, Katarzyna Omen-Mizerska, Krzysztof Strzeżek – Badania przewodności cieplnej izolacji cylindrycznych / Investigation of the thermal conductivity of cylindrical insulation	4
Sylwia Szczęśniak, Agnieszka Grabka – Sterowanie temperaturą powietrza w sali widowiskowej a zapotrzebowanie na energię – studium przypadku / Air temperature control in an auditorium and its impact on energy demand – A case study	14
Ireneusz Bauma – Dekarbonizacja systemów grzewczych poprzez zastępowanie grzałek elektrycznych źródłem biomasowym w instalacjach z pompą ciepła / Decarbonization of heating systems by replacing electric heaters with a biomass source in heat pump installations	21
Andrzej Obmiński – Wpływ zewnętrznych źródeł emisji azbestu na powietrze wewnętrzne eksploatowanych budynków / Impact of external asbestos emission sources on indoor air quality in occupied buildings	28
Piotr Michalak – Wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010-1 na wynikowe godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego The impact of errors in the PN-EN ISO 52010-1 standard on the resulting hourly values of total solar irradiance	35
Edward Bramson, Renata Sulima – Metoda doboru pomp ciepła do modułowych budynków dworców kolejowych w różnych strefach klimatycznych Polski / Method for selecting heat pumps for modular railway station buildings in different climatic zones of Poland.....	41
Wojciech Orzech, Jacek Mazur, Bożena Babiarz – Ochrona i bezpieczeństwo dostaw ciepła w dobie transformacji energetycznej. Jakiego rozwiązania są stosowane w systemie ciepłowniczym miasta Rzeszowa? / Protection and security of heat supply in the era of energy transformation. What solutions are used in the Rzeszow heating system?	47
Partnerzy w technologii	
Grzegorz Sypek – Zapobieganie przed zadymieniem przedsionków przeciwpożarowych. Jak uniknąć problemów eksploatacyjnych na etapie koncepcji projektowej	55
Grzegorz Grzyb, Andrzej Misiewicz, Jacek Murawski – Poprawa efektywności procesu pompowania na przykładzie Ciepłowni Malbork	59
Roman Krzywda, Bogumiła Wrzesińska – Rury preizolowane – z barierą dyfuzyjną czy bez?	65
Zbigniew Borkowski, Agnieszka Kęsa – Korczyńska, Petr Průka – Ciepło z polskiej elektrowni jądrowej	71
Prawo	
Andrzej Falkowski – Kontrola okresowa przewodów kominowych.....	74
Komunikat – Zmiany w programie Czyste Powietrze. Od 20 lipca łatwiej skorzystasz z dotacji.....	76
Raporty Głównej Komisji Legislacyjnej PZITS – warto być na bieżąco	78
Wydarzenia	
XIX ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna "Wentylacja Klimatyzacja Ogrzewnictwo Środowisko"	75
Forum Termomodernizacja 2026: Nowe możliwości techniczne i finansowe	77
XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza – o bezpieczeństwie, efektywności i przyszłości sektora ciepłowniczego	79
Pomaganie Buduje 2026. Jak polskie budownictwo zamienia relacje i sportową rywalizację w realną pomoc?.....	80
XXX Forum Ciepłowników Polskich	81
Branża grzewcza w centrum zmian. Heating Tech 2026 pokaże kierunek rozwoju rynku	82
Powrót do korzeni – przyjeżdż na Światowy Kongres Absolwentów Politechniki Wrocławskiej.....	83
Informacje dla autorów znajdują się na stronie: www.cieplownictwoogrzewnictwowentylacja.pl/wspolpraca-z-autorami	



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.krecielewska@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.

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

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

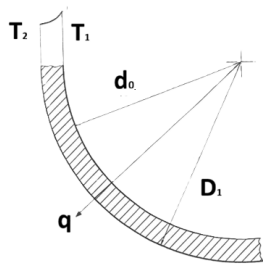
$$\lambda_i = \frac{q \cdot \ln \frac{D_i}{d_o}}{2 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3)$$

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

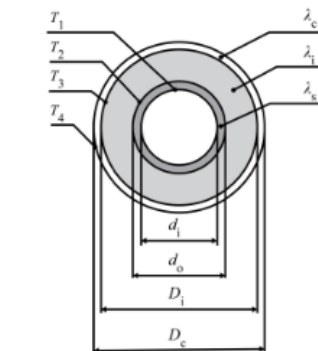
W przypadku rur preizolowanych przewodność cieplna izolacji wyznaczana jest w oparciu o pomiar strumienia ciepła, pomiar temperatury na powierzchni osłony i rury

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)

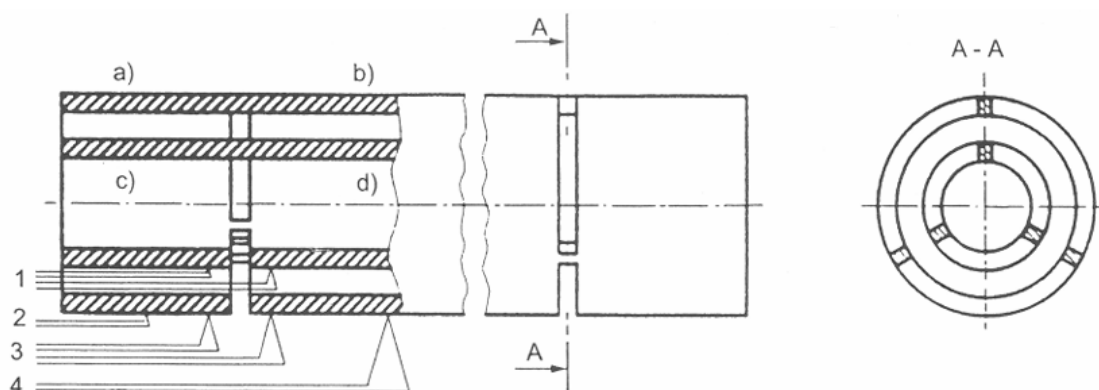
W urządzeniu tego typu (Rysunek 3) oprócz elementu grzejnego odcinka pomiarowego, na końcach rury badawczej znajdują się dodatkowe oddzielnie ogrzewane sekcje wg PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999) cylindry osłonowe³. System automatycznej regulacji zapewnia uzyskanie **jednakowej temperatury na końcach** (w sekcjach 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)

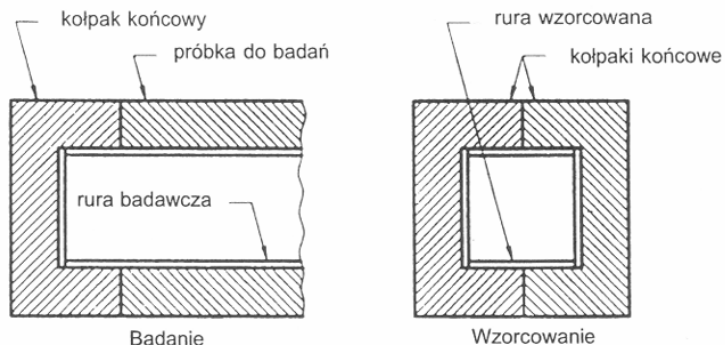
³ nazwa "cylinder osłonowy" użyta w polskiej normie PN-EN ISO 8497 (PKN, 1999) sugeruje zabezpieczenie końca rury badawczej odrębnym, dodatkowym elementem. W rzeczywistości są to sekcje końcowe rury badawczej wyposażone w elementy grzewcze stosowane w celu ograniczenia przepływu ciepła w kierunku osiowym



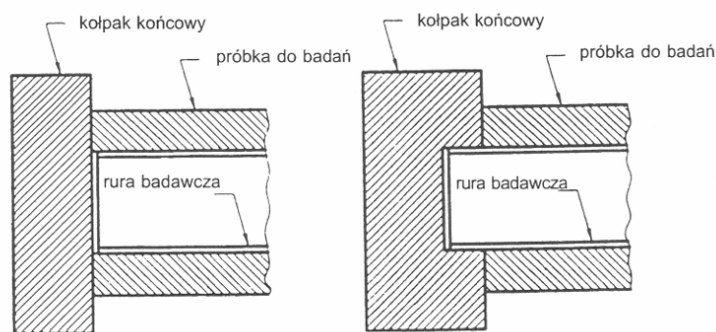
Rysunek 3. Aparat badawczy z cylindrami osłonowymi na końcach rury badawczej do badania izolacji cylindrycznych (PKN, 1999).

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 wyznaczane 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

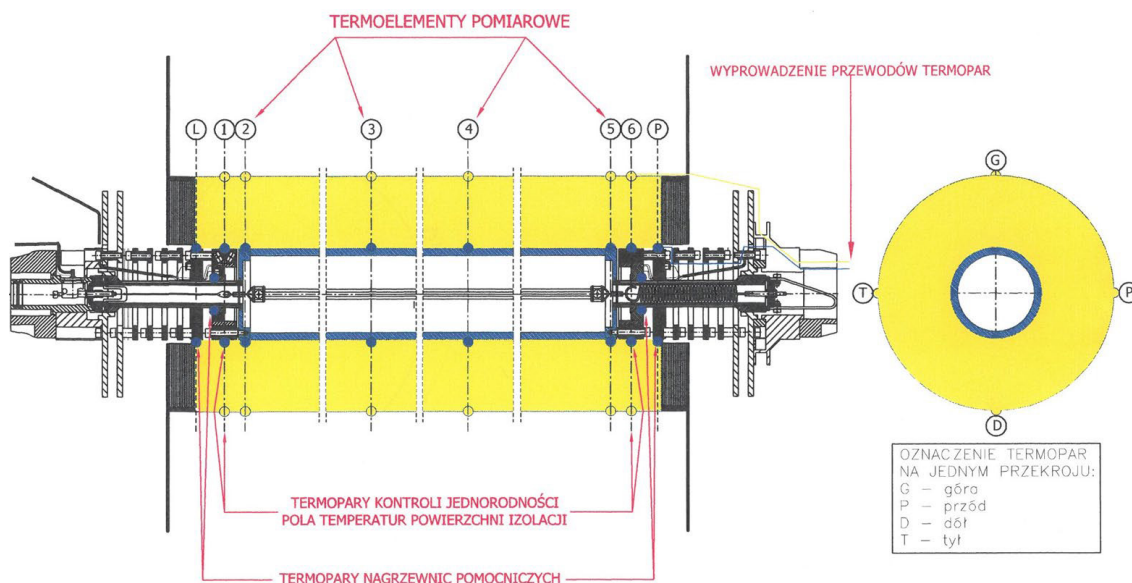
Badanie polega na wyznaczeniu przewodności cieplnej λ_{tm} w ustalonej średniej temperaturze izolacji t_m w zależności od przeznaczenia wyrobu.

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.

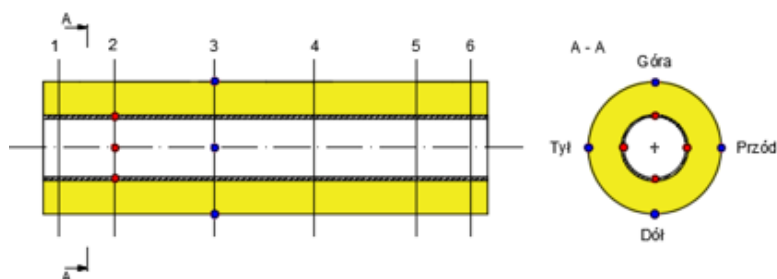
Aparat znajduje się w zamkniętym, klimatyzowanym pomieszczeniu.

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. Pomiędzy 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

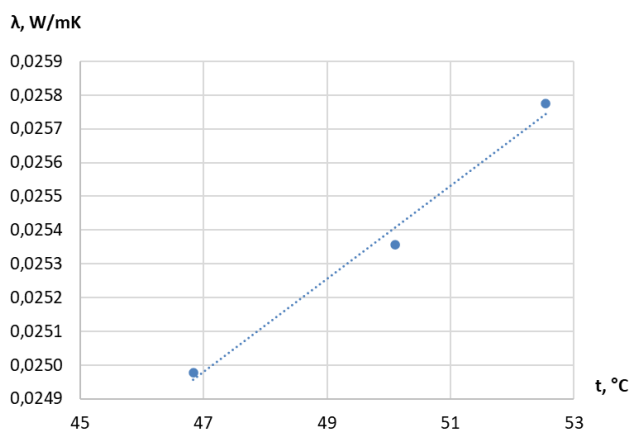
wyznacza się metodą regresji liniowej dla średniej temperatury izolacji 50°C, przy założonych temperaturach rury badawczej: 70°C, 80°C i 90°C.

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:

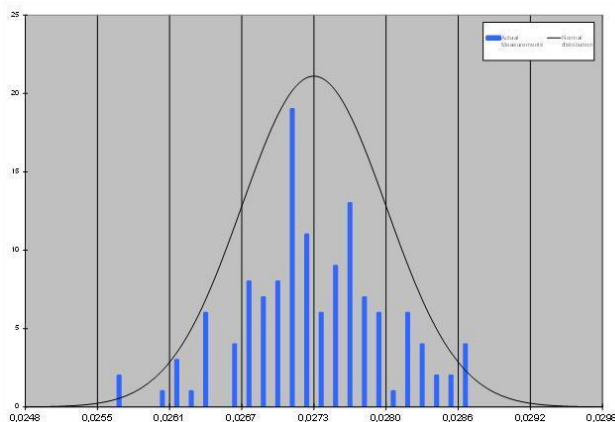
- zależności pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła i średnią temperaturą izolacji przedstawioną w formie graficznej oraz w postaci wzoru matematycznego $\lambda_{tm} = f(t_m)$ (Rysunek 8),
- wartości przewodności cieplnej wyznaczonej z funkcji $\lambda_{tm} = f(t_m)$ z rozszerzoną niepewnością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



Sterowanie temperaturą powietrza w sali widowiskowej a zapotrzebowanie na energię – studium przypadku

Air temperature control in an auditorium and its impact on energy demand – A case study



Dr inż. Sylwia Szczesniak

ORCID ID: [0000-0003-4358-0263](https://orcid.org/0000-0003-4358-0263)

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska
PZITS O. Dolnośląski
sylwia.szczesniak@pwr.edu.pl



Mgr inż. Agnieszka Grabka

ORCID ID: [0009-0001-4781-5050](https://orcid.org/0009-0001-4781-5050)

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska

Słowa kluczowe: odzysk ciepła, HVAC, gradient temperatury powietrza, zyski ciepła, nagrzewnica, chłodnica
Streszczenie

W artykule przeanalizowano wpływ różnicy temperatury powietrza nawiewanego Δt_p oraz sposobu sterowania instalacją wentylacyjną na zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniu. Rozważono dwa warianty regulacji temperatury powietrza w strefie pracy: sterowanie skokowe (21–24°C) oraz płynne (komfortowe), przy zróżnicowanych strumieniach powietrza wentylacyjnego oraz poziomach frekwencji. Wyniki analiz wykazały, że zwiększenie Δt_p z 8°C do 10°C prowadzi do wzrostu zużycia energii elektrycznej na transport powietrza o ok. 60%, przy jednoczesnym istotnym ograniczeniu zapotrzebowania na energię do ogrzewania (o 68–78%). Wpływ tej zmiany na zapotrzebowanie na energię chłodniczą jest bardziej złożony i zależy od warunków pracy układu. Największe ograniczenie zapotrzebowania na energię chłodniczą (ok. 40%) uzyskano dla maksymalnej frekwencji i płynnej regulacji temperatury, natomiast najmniejsze (ok. 12%) dla maksymalnego strumienia powietrza i sterowania skokowego. Wykazano również istotny wpływ strategii sterowania na zapotrzebowanie na energię chłodniczą. Przy większych strumieniach powietrza wentylacyjnego sterowanie skokowe charakteryzuje się niższym zapotrzebowaniem (o 25–41%) w porównaniu do regulacji płynnej, przy czym różnice te maleją wraz ze zmniejszeniem strumienia powietrza. Uzyskane wyniki wskazują, że dobór różnicy temperatury Δt_p , strumienia powietrza wentylacyjnego oraz strategii sterowania ma kluczowe znaczenie dla efektywności energetycznej systemu wentylacyjnego i powinien być rozpatrywany w sposób kompleksowy.

Keywords: heat recovery, HVAC, air temperature gradient, heat gains, heater, cooler

Abstract

This paper presents an analysis of the impact of the supply air temperature difference Δt_p and control strategy on the energy demand in a ventilated space. Two approaches to indoor temperature control in the occupied zone were considered: step control (21–24°C) and continuous (comfort-based) control, under varying ventilation airflow rates and occupancy levels. The results indicate that increasing Δt_p from 8°C to 10°C leads to an approximately 60% increase in electrical energy consumption for air transport, while simultaneously reducing the heating energy demand by 68–78%. The effect on cooling energy demand is more complex and depends on operating conditions. The greatest reduction (approximately 40%) was observed for maximum occupancy with continuous control, whereas the smallest reduction (approximately 12%) occurred at the maximum airflow rate under step control. The control strategy was also found to significantly influence cooling energy demand. At higher ventilation airflow rates, step control resulted in lower cooling demand (by approximately 25–41%) compared to continuous control, with the differences decreasing as the airflow rate was reduced. The findings demonstrate that the selection of Δt_p , ventilation airflow rate, and control strategy has a substantial impact on the overall energy performance of the ventilation system and should be considered in an integrated manner.

Wstęp

Systemy wentylacyjne odgrywają kluczową rolę w usuwaniu zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego, takich jak CO₂, lotne związki organiczne (LZO) oraz zapachy (Ferencowicz, 1962; Pełech, 2013; S. Przydróżny & Ferencowicz, 1988). W wielu przypadkach wentylacja odpowiada także za utrzymanie odpowiedniej wartości temperatury powietrza w strefie pracy w pomieszczeniach mieszkalnych, użyteczności publicznej, jak i przemysłowych (Fe-

rencowicz, 1962; Pełech, 2013; S. Przydróżny & Ferencowicz, 1988). W zależności od sposobu działania, wyróżnia się wentylację naturalną (m.in. wentylację grawitacyjną, aerację, przewietrzanie) oraz wentylację mechaniczną (nawiewną, wywiewną i nawiewno-wywiewną) (Pełech, 2013). Dla zapewnienia odpowiedniej czystości powietrza oraz wymaganych warunków termicznych i wilgotnościowych w pomieszczeniach niemieszkalnych stosuje się systemy klimatyzacji pełnej lub niepełnej, zgodnie z PN-EN 16798-3 (PKN, 2019). Dobór odpowiedniego systemu

wentylacji lub klimatyzacji zależy od funkcji pomieszczenia, jego charakterystyki architektoniczno-budowlanej, sposobu użytkowania oraz zmienności obciążeń cieplnych i wilgotnościowych. Zarówno wentylacja mechaniczna, jak i klimatyzacja wiążą się z nakładami energetycznymi niezbędnymi do ogrzewania, chłodzenia, nawilżania i osuszania powietrza, a także do jego transportu. Efektywność działania tych systemów zależy od czynników wpływających jednocześnie na jakość powietrza wewnętrznego oraz zużycie energii. Jednym z kluczowych elementów determinujących efektywność wentylacji jest sposób organizacji przepływu powietrza w pomieszczeniu, w ramach którego wyróżnia się m.in. wentylację mieszającą oraz wentylację wyporową. Wentylacja mieszająca prowadzi do wyrównania parametrów powietrza w całej kubaturze pomieszczenia, natomiast wentylacja wyporowa wykorzystuje stratyfikację termiczną i siły wyporu, umożliwiając skuteczniejsze usuwanie zanieczyszczeń z obszaru przebywania ludzi (Pełech, 2013). Do pozostałych czynników wpływających na efektywność energetyczną oraz skuteczność wentylacji należą: kontrola źródeł zanieczyszczeń i ich skuteczne usuwanie, sterowanie wentylacją w funkcji jakości powietrza wewnętrznego, bilansowanie strumieni powietrza, wykorzystanie zmiennych warunków zewnętrznych oraz stosowanie energooszczędnych urządzeń i elementów, takich jak wentylatory, silniki EC czy wymienniki do odzysku ciepła.

Jednym z istotnych zjawisk wpływających na efektywność energetyczną systemów wentylacyjnych i zarazem komfort cieplny użytkowników jest pionowy gradient temperatury powietrza, rozumiany jako zmiana temperatury powietrza wraz z wysokością pomieszczenia. Wielkość tego gradientu zależy od bilansu zysków ciepła, intensywności wymiany powietrza oraz organizacji przepływu, w tym lokalizacji nawiewów i wywiewów (S. Przydróżny & Ferencowicz, 1988; Szczeńsiak i in., 2014).

Zjawisko pionowego gradientu temperatury w pomieszczeniach jest ściśle związane z przyjętym sposobem rozdziału powietrza. W wentylacji wyporowej stratyfikacja termiczna jest efektem zamierzonym, wykorzystywanym do transportu ciepła ku górze oraz usuwania go ponad strefą przebywania ludzi. W wentylacji mieszającej dąży się natomiast do możliwie jednorodnych warunków w strefie pracy, jednak również w tym przypadku może wystąpić istotny pionowy gradient temperatury powietrza, szczególnie przy układzie nawiewu zlokalizowanego w górnej części strefy pracy i wywiewu wysoko pod stropem pomieszczenia oraz przy znaczących lokalnych zyskach ciepła. W takiej konfiguracji siły wyporu sprzyjają unoszeniu ogrzanego powietrza do górnych warstw pomieszczenia, co może ograniczać skuteczność mieszania w całej kubaturze (Przydróżny & Szczeńsiak, 2013; Szczeńsiak & Sompoliński, 2011).

Znaczenie pionowego gradientu temperatury powietrza w pomieszczeniach wentylowanych mechanicznie rośnie wraz z wysokością pomieszczenia. W przypadku pomieszczeń niskich ($H_p \leq 4$ m) gradient ten zazwyczaj ma ograniczony wpływ na komfort i efektywność energetyczną. W pomieszczeniach wysokich ($H_p > 4$ m) z wywiewem montowanym pod stropem stratyfikacja bywa wyraźna i może istotnie wpływać na dobór strumieni powietrza, bilans energetyczny oraz warunki termiczne w strefie

przebywania ludzi (Karpuk i in., 2017). Do głównych czynników kształtujących wartość pionowego gradientu temperatury powietrza w pomieszczeniach wentylowanych mechanicznie należą lokalne źródła ciepła, rozmieszczenie elementów nawiewnych i wywiewnych oraz intensywność wymiany powietrza. Niekorzystna konfiguracja tych elementów może prowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury powietrza w warstwach powyżej strefy użytkowej, co skutkuje obniżeniem efektywności działania systemu oraz wzrostem zużycia energii.

Prawidłowe uwzględnienie pionowego gradientu temperatury powietrza, zarówno w przypadku wentylacji mieszającej jak i wyporowej, w obliczeniach projektowych umożliwia optymalizację strumienia powietrza wentylacyjnego oraz dobór organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu, co przekłada się na ograniczenie kosztów eksploatacyjnych i poprawę komfortu użytkowników. W literaturze (Przydróżny i in., 1988; Przydróżny & Szczeńsiak, 2013) przedstawiono zależności empiryczne pozwalające określić przyrost temperatury w funkcji jednostkowego obciążenia cieplnego oraz warunków wymiany powietrza w pomieszczeniu. Wysokie wartości pionowego gradientu temperatury powietrza mogą stanowić również przesłankę do weryfikacji rozmieszczenia źródeł ciepła oraz konfiguracji instalacji nawiewno-wywiewnej (Gil-Lopez i in., 2017).

Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej oraz dążeniem do ograniczenia zużycia energii, efektywne zarządzanie temperaturą powietrza w strefie przebywania ludzi w pomieszczeniach o dużej kubaturze, takich jak obiekty widowiskowe, kina, teatry oraz obiekty przemysłowe, nabiera coraz większego znaczenia. Kluczowym wyzwaniem w tego typu obiektach jest jednocześnie zapewnienie komfortu cieplnego użytkowników oraz minimalizacja zapotrzebowania na energię niezbędną do jego utrzymania. Osiągnięcie tego celu wymaga przyjęcia kompromisu pomiędzy dopuszczalnymi wartościami przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniach oraz komfortu termicznego użytkowników a kosztami eksploatacyjnymi. Nadal, zarówno w systemach wentylacji, jak i klimatyzacji, jednym z największych wyzwań pozostaje minimalizacja kosztów transportu powietrza, możliwa do osiągnięcia poprzez ograniczanie strumienia powietrza wentylacyjnego wraz z prawidłowym sterowaniem pracą urządzenia, w tym zarządzaniem temperaturą powietrza nawiewanego oraz w pomieszczeniach (Lastovets i in., 2018; Overby, 1994; Overby & Steen-Thøde, 1990).

Cel analizy

Celem niniejszego artykułu jest analiza pracy systemu wentylacyjnego obsługującego salę widowiskową zlokalizowaną w jednym z istniejących obiektów użyteczności publicznej we Wrocławiu. W obiekcie zastosowano wentylację wyporową z nawiewem powietrza pod fotelami w strefie widowni. Analizę przeprowadzono dla dwóch różnych wartości strumienia powietrza wentylacyjnego oraz dwóch strategii sterowania temperaturą w strefie przebywania ludzi: stałej oraz skokowo zmiennej (z odrębnymi wartościami zadanymi dla lata i zimy). Uwzględniono przy tym, że w rozpatrywanych wariantach eksploatacyjnych występuje pionowy gradient temperatury

powietrza, który jest zjawiskiem charakterystycznym dla zastosowanej wentylacji wyporowej.

Charakterystyka obiektu

Analizie poddano salę widowiskową o dużej kubaturze, zaliczaną do pomieszczeń wysokich. Średnia wysokość pomieszczenia wynosi 14,43 m, a powierzchnia użytkowa 632,9 m². Widownia obejmuje 733 miejsca siedzące. Jediną przegrodą zewnętrzną pomieszczenia jest stropodach. Dominującym źródłem zysków ciepła w pomieszczeniu są zyski od osób przebywających na widowni. Powietrze wentylujące dostarczane jest do sali za pomocą nawiewników podfotelowych, zlokalizowanych w dolnej strefie przebywania ludzi, co odpowiada organizacji przepływu powietrza przez pomieszczenie charakterystycznej dla wentylacji wyporowej. Zastosowana organizacja nawiewu, w połączeniu z dużą wysokością pomieszczenia oraz znaczącymi zyskami ciepła od ludzi, sprzyja powstawaniu pionowego gradientu temperatury powietrza, którego obecność i wpływ na pracę systemu wentylacyjnego stanowią istotny element dalszej analizy. W istniejącym układzie wentylacyjnym zastosowano centralę nawiewno-wywiewną z obrotowym wymiennikiem do odzysku ciepła o sprawności temperaturowej $\eta_t = 75\%$. Powietrze

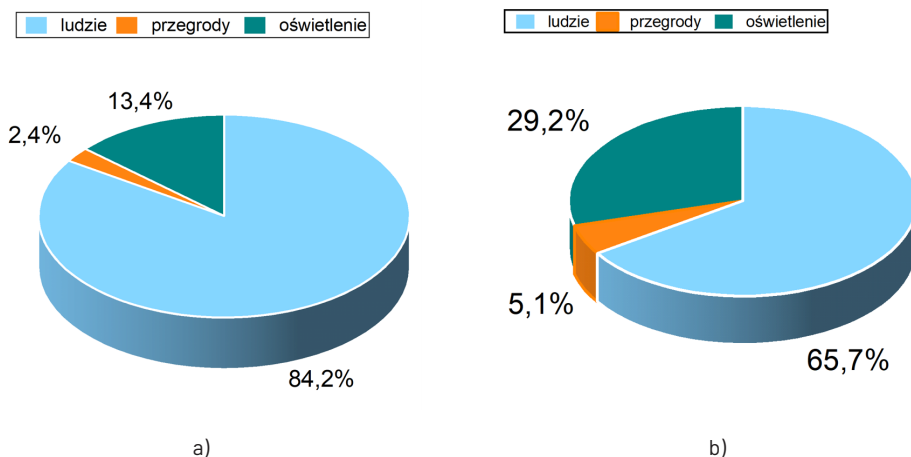
zewewnętrzne, przed wprowadzeniem do pomieszczenia, podlega filtracji na filtrze o skuteczności ePM2,5 65–95% zgodnie z PN-EN ISO 16890-1:2017-01 (PKN, 2017), co odpowiada filtrom klasy F7 według EN 779 (Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej — Określanie parametrów filtracyjnych, 2012). W okresie zimowym powietrze zewnętrzne jest wstępnie podgrzewane w wymienniku do odzysku ciepła i dogrzewane w nagrzewnicy wodnej do wymaganej temperatury powietrza nawiewanego, natomiast w okresie letnim podlega wstępnemu chłodzeniu w wymienniku do odzysku ciepła oraz końcowemu schładzaniu w chłodnicy wodnej do temperatury zadanej. Podział zysków ciepła w pomieszczeniu obejmuje zyski od przegród budowlanych, oświetlenia oraz osób przebywających na widowni. W obliczeniach przyjęto zmienne w czasie profile zysków ciepła, zgodne z harmonogramem użytkowania obiektu w godzinach od 08:00 do 22:00. Zyski ciepła od osób określono w dwóch wariantach obciążenia widowni: pełnego zapełnienia (100%) oraz częściowego zapełnienia odpowiadającego 43% liczby miejsc, przy czym warianty te traktowano jako stałe poziomy obciążenia w okresach użytkowania. Zyski ciepła od oświetlenia oraz przegród budowlanych określono zgodnie z przyjętymi założeniami obliczeniowymi i uwzględniono w bilansie cieplnym pomieszczenia w sposób ciągły

w trakcie godzin eksploatacji. Procentowy udział poszczególnych źródeł ciepła w bilansie sumarycznym w wariancie minimalnej i maksymalnej frekwencji w okresie letnim przedstawiono na Rysunku 1.

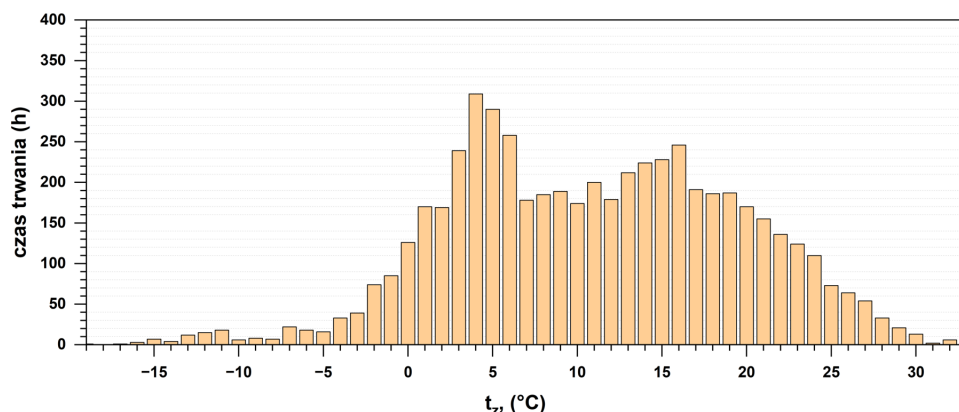
Metodyka analizy

Do wyznaczenia zapotrzebowania na moc oraz energię niezbędną do ochładzania i ogrzewania powietrza wykorzystano metodologię opisaną w (Przydrożny, 2004; Szczęśniak i in., 2023). Liczbę godzin występowania poszczególnych wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza zewnętrznego określono dla typowego roku meteorologicznego na podstawie danych dostępnych na stronie Fizyka-budowli.pl dla stacji Wrocław-Strachowice (51.1033° N, 16.90 00° E).

W analizie przyjęto, że temperatura powietrza nawiewanego (t_n) jest zawsze o 2°C niższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu, co jest zgodne z wytycznymi podawanymi w literaturze dotyczącej nawiewu podłogowego (Pełech, 2013). Takie założenie umożliwia wykorzystanie sił wyporu



Rysunek 1. Procentowy udział poszczególnych źródeł ciepła w bilansie sumarycznym przy (a) frekwencji maksymalnej i (b) frekwencji minimalnej (b) Źródło: opracowanie własne
Figure 1. Percentage contribution of individual heat sources to the total heat balance at (a) maximum occupancy and (b) minimum occupancy Source: authors' own study

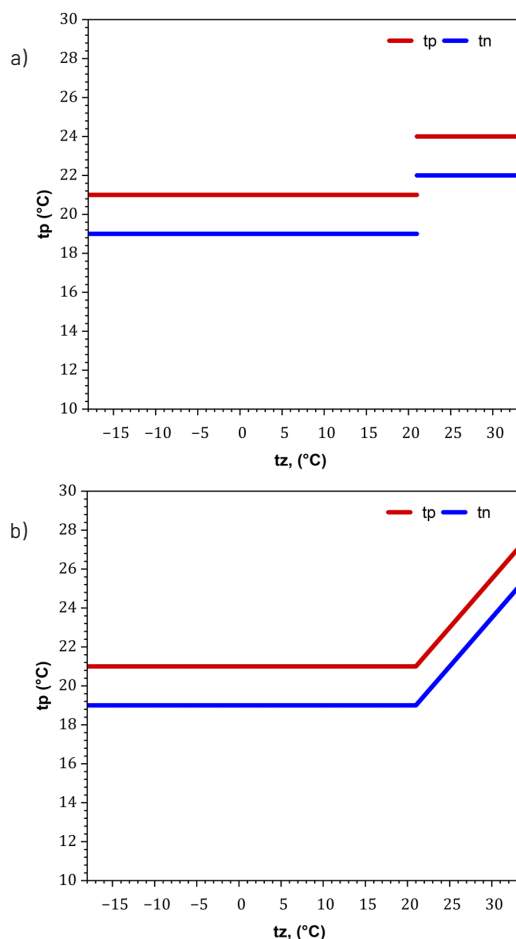


Rysunek 2. Czas występowania temperatury powietrza zewnętrznego dla Wrocławia dla godzin 8:00 do 22:00. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Duration of occurrence of outdoor air temperature in Wrocław for the hours 8:00–22:00 Source: authors' own study

Tabela 1. Najważniejsze założenia przyjęte do obliczeń. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Main assumptions adopted for calculations. Source: authors' own study

Parametr		1	2
Strumień powietrza wentylacyjnego	$V, \text{m}^3/\text{s}$	8,082	6,586
Jednostkowy strumień powietrza zewnętrznego	$V_{zj}, \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{os}$	$40 \div 92$	$32 \div 75$
Przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu	$\Delta t_p, ^\circ\text{C}$	8	10
Temperatura powietrza nawiewanego	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_p - 2$	$t_p - 2$
Maksymalna liczba osób	$n^{\max}, \text{os.}$	733	733
Minimalna liczba osób	$n^{\min}, \text{os.}$	315	315



Rysunek 3. Przebieg temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz nawiewanego dla omawianych algorytmów sterowania (a) sterowanie skokowe (21–24), (b) sterowanie wg komfortu cieplnego (komfort). Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Air temperature profiles in the room and of the supply air for the control algorithms under consideration: (a) step control (21–24); (b) thermal comfort control (comfort). Source: authors' own study

Tabela 2. Analizowane warianty sterowania temperaturą oraz frekwencja w pomieszczeniu. Źródło: opracowanie własne

Wariant	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Strumień powietrza, m^3/s	4,076	8,083	4,076	8,083	3,261	6,466	3,261	6,466
Frekwencja	$n^{\min}$	$n^{\max}$	$n^{\min}$	$n^{\max}$	$n^{\min}$	$n^{\max}$	$n^{\min}$	$n^{\max}$
Przyjęty sposób sterowania	21–24	komfort	21–24	komfort	21–24	komfort	21–24	komfort

przy jednoczesnym zachowaniu komfortu cieplnego w strefie przebywania ludzi. Minimalna dopuszczalna temperatura powietrza w pomieszczeniu (w strefie pracy) w okresie zimowym wynosi $t_p = 21^\circ\text{C}$. Maksymalna dopuszczalna temperatura powietrza w strefie pracy w okresie letnim została przyjęta na poziomie $t_p = 27^\circ\text{C}$, przy temperaturze komfortu zależnej od temperatury powietrza zewnętrznego oraz $t_p = 24^\circ\text{C}$, co jest częstym rodzajem sterowania przyjmowanym w funkcjonujących obiektach. Dla celów analizy przyjęto dwa strumienie powietrza wentylacyjnego, wyznaczone na podstawie bilansu ciepła jawnego. Do ich określenia zastosowano dwie różne wartości przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu Δt_p (różnicę między temperaturą powietrza wywiewanego i nawiewanego). Przyjęto wartości Δt_p równe 8°C oraz 10°C , gdzie 8°C stanowi wartość typową dla systemów bez gradientu temperatury, natomiast 10°C może być stosowane w systemach z pionowym gradientem temperatury powietrza. W efekcie w analizie uzyskano jednostkowy strumień powietrza zewnętrznego zawierający się w przedziale od $32 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os})$ dla wariantu maksymalnej frekwencji i strumienia powietrza wentylacyjnego wyznaczonego dla $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ do $94 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{os})$ dla wariantu minimalnej frekwencji. Przyjęte wartości spełniają wymagania dla pomieszczeń kategorii I i II zgodnie z normą PN-EN 16798-1:2019-06 (PN, 2019) oraz wymagania określone w Warunkach Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022). Najważniejsze założenia przyjęte do obliczeń podano w Tabeli 1.

W analizie przyjęto dwie podstawowe metody utrzymywania temperatury powietrza w pomieszczeniu. Jedną z nich zakłada dostosowanie temperatury powietrza w pomieszczeniu do chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego, która ogranicza stres termiczny i jest zgodna z zaleceniami dotyczącymi komfortu termicznego (komfort). Druga jest metodą powszechnie stosowaną w systemach automatyki, która zakłada określoną temperaturę powietrza w pomieszczeniu w okresie zimowym oraz inną, ale również stałą temperaturę powietrza w okresie letnim (21–24). Algorytmy sterowania temperaturą powietrza w pomieszczeniu (w strefie przebywania ludzi) $t_p = f(t_z)$ oraz zmiany temperatury powietrza nawiewanego t_n przedstawiono na Rysunku 3.

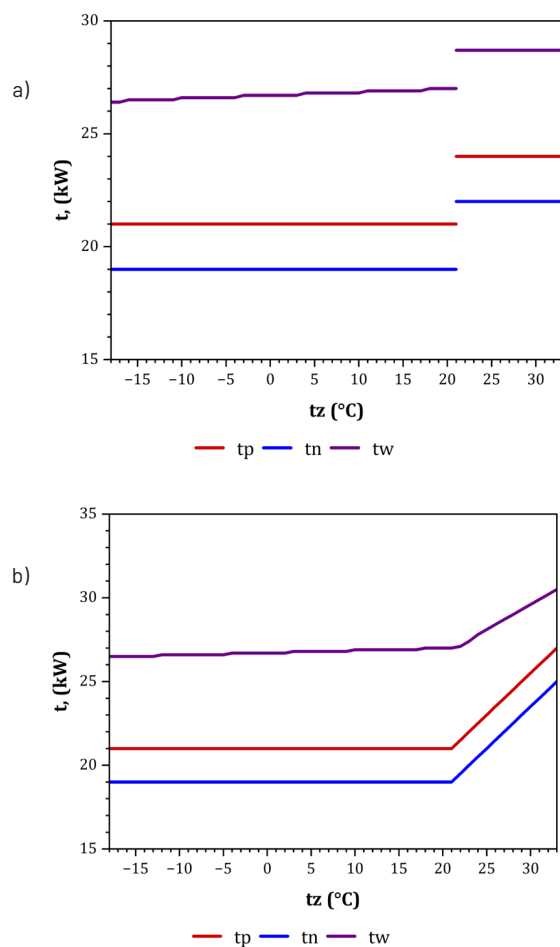
Łącznie analizie poddano 8 wariantów pracy urządzenia. Analizowane warianty sterowania temperaturą oraz frekwencję w pomieszczeniu podano w Tabeli 2.

Wyniki analizy

Przykładowe wyniki przebiegu temperatury powietrza wywiewanego z pomieszczenia w zależności od przyjętej metody sterowania pracą systemu wentylacyjnego dla przyjętego przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ przedstawiono na Rysunku 4 (a) i (b). Temperatura powietrza wywiewanego decyduje o tempe-

raturze powietrza za wymiennikiem do odzysku ciepła, co w konsekwencji ma wpływ na chwilową moc nagrzewnicy i chłodnicy.

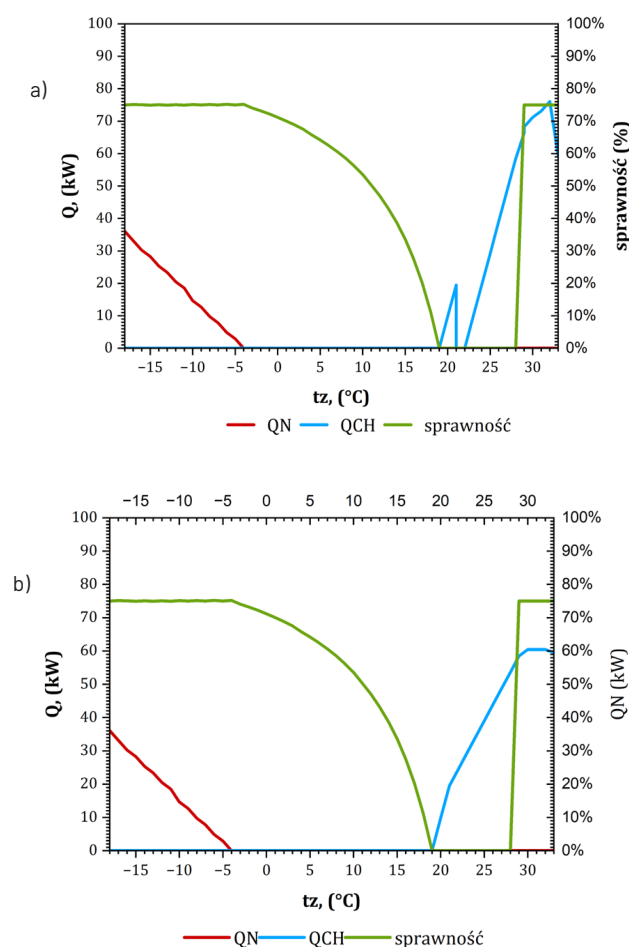
Utrzymanie wymaganej temperatury powietrza w strefie pracy jest możliwe zarówno w przypadku sterowania skokowego (21–24), jak i płynnego (komfort). W obu przypadkach temperatura powietrza wywiewanego z pomieszczenia zależy od chwilowego obciążenia cieplnego pomieszczenia i przyjętego strumienia powietrza wentylacyjnego. Należy tutaj zwrócić uwagę na wysokie wartości temperatury powietrza usuwanego z pomieszczenia i kierowanego na wymiennik do odzysku ciepła. W tym przypadku szczególnie istotne jest zapewnienie możliwości płynnej regulacji sprawności odzysku ciepła. Jak pokazuje praktyka eksploatacyjna, w wielu istniejących obiektach brak takiej regulacji prowadzi do nieprawidłowej pracy układu i ograniczenia efektywności odzysku ciepła. Przykładowy wykres obrazujący chwilową moc nagrzewnicy i chłodnicy oraz chwilową sprawność temperatury wymiennika do odzysku ciepła w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego w zależności od przyjętej metody sterowania pracą systemu wentylacyjnego dla



Rysunek 4. Przebieg temperatury powietrza w pomieszczeniu, nawiewanego oraz wywiewanego dla $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ i maksymalnej frekwencji oraz przyjętych warunków sterowania (a) sterowanie skokowe (21–24), (b) sterowanie komfortu cieplnego (komfort). Źródło: opracowanie własne

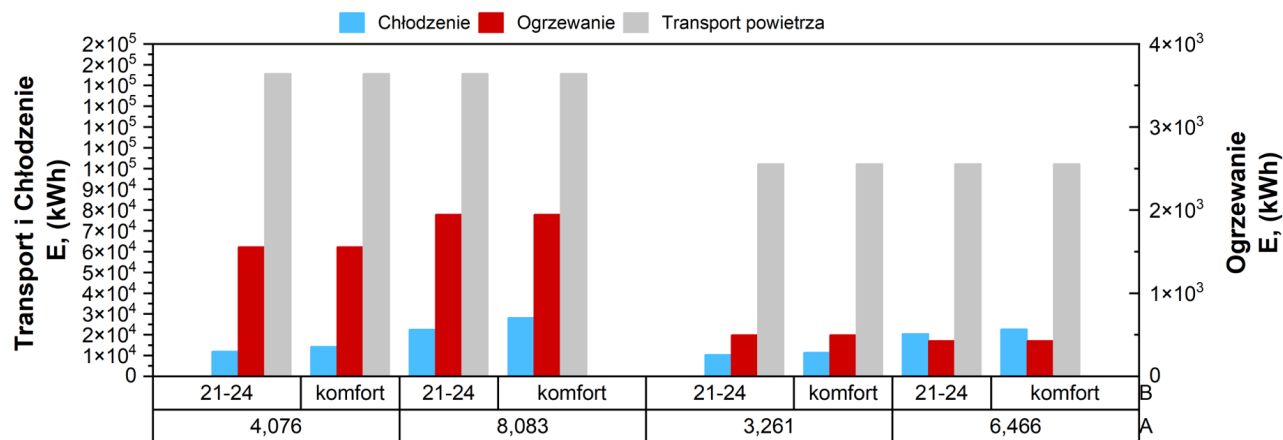
Figure 4. Air temperature profiles in the room, supply air and exhaust air for $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ and maximum occupancy under the adopted control conditions: (a) step control (21–24), (b) thermal comfort control (comfort). Source: authors' own study

przyjętego przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ przedstawiono na Rysunku 5 (a) i (b). Chwilowa moc z jaką pracuje nagrzewnica jest jednakowa zarówno w przypadku sterowania temperaturą powietrza w pomieszczeniu skokowego, jak i płynnego. Wynika to z faktu utrzymywania minimalnej temperatury powietrza w pomieszczeniu zarówno w okresie zimowym niezależnie od przyjętego algorytmu sterowania. Profil pracy chłodnicy, która jest realizowana w warunkach zmieniającej się temperatury powietrza w strefie pracy wykazuje zdecydowanie inną charakterystykę. W sterowaniu skokowym, ze względu na przełączanie temperatury powietrza w strefie pracy z czasu zimowego na letni widoczna jest chwilowa gwałtowna zmiana mocy oraz jej późniejszy szybki wzrost. W przypadku płynnego sterowania temperaturą powietrza w strefie pracy wzrost mocy chłodnicy jest znacznie łagodniejszy. Maksymalna moc jest znacznie większa dla chłodnicy pracującej w układzie ze sterowaniem skokowym w porównaniu do układu pracującego ze sterowaniem płynnym. Należy tutaj jednak zwrócić uwagę na fakt, iż w warunkach temperatury powietrza zewnętrznego o najwyższej liczbie godzin trwania w przy-



Rysunek 5. Chwilowa moc nagrzewnicy i chłodnicy oraz sprawność temperaturowa wymiennika do odzysku ciepła dla $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ i maksymalnej frekwencji oraz przyjętych warunków sterowania (a) sterowanie skokowe (21–24), (b) sterowanie komfortu cieplnego (komfort). Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Instantaneous heating and cooling coil capacity, and temperature efficiency of the heat recovery exchanger for $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ and maximum occupancy under the adopted control conditions: (a) step control (21–24), (b) thermal comfort control (comfort). Source: authors' own study



Rysunek 6. Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową niezbędną do zapewnienia wymaganej temperatury w strefie pracy dla wszystkich analizowanych przypadków. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. Annual useful energy demand required to maintain the specified temperature in the occupied zone for all analysed cases. Source: authors' own study

padku sterowania skokowego chwilowe zapotrzebowanie na moc jest większe niż w przypadku sterowania płynnego. Ma to wpływ na roczne zapotrzebowanie na energię. W obu przypadkach sprawność wymiennika do odzysku ciepła sterowana jest na podstawie mierzonej temperatury powietrza usuwanego z pomieszczenia, która jest znacznie wyższa od temperatury utrzymywanej w strefie pracy. Warto tutaj zwrócić uwagę na to, że przez większą część czasu (5278 godzin) wymiennik do odzysku ciepła pracuje ze sprawnością znacznie niższą niż maksymalna. Sprawność maksymalna utrzymywana jest przez ok. 197 godzin w roku.

Porównanie rocznego zapotrzebowania na energię niezbędną do ogrzewania, ochładzania i transportu powietrza przedstawiono na Rysunku 6.

W ogólnej analizie można zauważyć, że zwiększenie $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ do $\Delta t_p = 10^\circ\text{C}$ spowodowało wzrost zużycia energii elektrycznej do transportu powietrza średnio o ok. 60%. Jednocześnie przy zmianie strumienia powietrza wentylacyjnego obserwuje się istotne obniżenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania, wynoszące odpowiednio ok. 68% dla frekwencji minimalnej oraz 78% dla frekwencji maksymalnej. Wyraźnie większe zróżnicowanie widoczne jest w przypadku zapotrzebowania na energię cieplną niezbędną do ochładzania powietrza. W tym przypadku dla maksymalnej frekwencji i płynnej regulacji temperatury powietrza w strefie pracy, zmiana $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ na $\Delta t_p = 10^\circ\text{C}$, daje największe ograniczenie energii, które wynosi 40%. Najmniej efektywne ograniczenie zapotrzebowania na energię do chłodzenia uzyskano w przypadku maksymalnego strumienia powietrza wentylacyjnego i sterowania skokowego (o ok. 12%). W przypadku minimalnej frekwencji ograniczenie zapotrzebowania na energię wynosiło ok. 24% dla sterowania skokowego i 20% dla sterowania płynnego.

Porównanie zapotrzebowania na energię niezbędną do chłodzenia w odniesieniu do rodzaju sterowania wskazuje, że w przypadku większego strumienia powietrza wentylacyjnego sterowanie skokowe charakteryzuje się mniejszym zapotrzebowaniem o ok. 25% w przypadku frekwencji minimalnej i o ok. 41% w przypadku frekwencji maksymalnej. Zmniejszenie strumienia powietrza wentylacyjnego, a tym samym wzrost temperatury powietrza

usuwanego z pomieszczenia zmniejsza tą dysproporcję do wartości 28% i 26% odpowiednio dla frekwencji minimalnej i maksymalnej.

Podsumowanie i wnioski

Artykuł przedstawia wyniki analizy efektywności energetycznej różnych strategii sterowania systemem wentylacji z odzyskiem ciepła w pomieszczeniu wysokim, na przykładzie dużego obiektu widowiskowego. Porównano dwa podejścia do sterowania temperaturą nawiewanego powietrza: regulację płynną, nadążającą za temperaturą powietrza zewnętrznego (komfort ciepła) oraz regulację skokową (przełączanie układu z pracy zimowej na letnią). Dodatkowo uwzględniono dwie różne wartości przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu tj. $\Delta t_p = 8^\circ\text{C}$ na $\Delta t_p = 10^\circ\text{C}$. W analizie uwzględniono także minimalną i maksymalną frekwencję, dla której należy zachować zadaną temperaturę powietrza w strefie pracy.

Analiza wykazała, że dobór wartości Δt_p oraz strategii sterowania temperaturą w strefie pracy a także przyjęcie strumienia powietrza wentylacyjnego mają istotny wpływ na bilans energetyczny systemu i powinny być analizowane kompleksowo.

Wewnętrzne zyski ciepła w obiektach widowiskowych w głównej mierze zależą od przyjętej temperatury powietrza w strefie pracy i oddziałują zarówno na zapotrzebowanie na energię cieplną do ogrzewania jak i ochładzania.

W uzyskanych wynikach można zauważyć, że w obiektach wysokich kluczowe znaczenie dla efektywności energetycznej systemu ma właściwy dobór przyrostu temperatury powietrza, ale wybór algorytmu regulacji nadal pełni istotną rolę.

Bibliografia

- Ferencowicz, J. (1962). *Wentylacja i Klimatyzacja* (2. wyd.). Arkady.
- Gil-Lopez, T., Galvez-Huerta, M. A., O'Donohoe, P. G., Castejon-Navas, J., & Dieguez-Elizondo, P. M. (2017). Analysis of the influence of the return position in the vertical temperature gradient in displacement ventilation systems for large halls. *Energy and Buildings*, 140, 371–

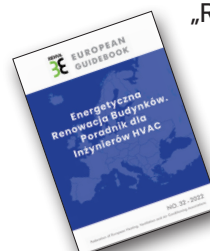
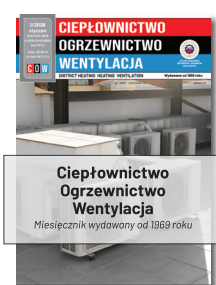
379. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.017>
Karpuk, M., Pelech, A., Przydróżny, E., Walaszczyk, J., & Szczęśniak, S. (2017). Air temperature gradient in large industrial hall. E3S Web of Conferences, 22.
- Lastovets, N., Kosonen, R., Mustakallio, P., Kharkiv, in, & Oy, H. (2018). Comparison of simplified models to estimate vertical temperature gradient in rooms with displacement ventilation. 499–504. www.tcpdf.org
- Overby, H. (1994). Measurement and Calculation of Vertical Temperature Gradients in Rooms with Convective Flows. W Indoor Environmental Technology Bind R9417 (T. 42). Indoor Environmental Technology Bind R9417.
- Overby, H., & Steen-Thøde. (1990). Calculation of Vertical Temperature Gradients in Heated Rooms. Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Indoor Environmental Technology, 9046(17).
- Pelech, A. (2013). *Wentylacja i klimatyzacja. Podstawy*. (4. wyd.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- PKN. (2017). PN-EN ISO 16890-1:2017-01. Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej — Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji określony na podstawie skuteczności filtracji cząstek pyłu (ePM). Polski Komitet Normalizacyjny
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06. Charakterystyka energetyczna budynków — Wentylacja budynków — Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki — Moduł M1-6. Polski Komitet Normalizacyjny
- PKN. (2025). PN-EN 16798-3:2025-10. Charakterystyka energetyczna budynków — Wentylacja budynków — Część 3: Wentylacja budynków niemieszkalnych — Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń (moduły M5-1, M5-4). Polski Komitet Normalizacyjny.
- Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej — Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji określony na podstawie skuteczności filtracji cząstek pyłu (ePM), Legislation PN-EN ISO 16890-1:2017-01, 34 (2017).
- Przeciwpływowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej — Określanie parametrów filtracyjnych, Legislation PN-EN 779:2012 (2012).
- Przydróżny, E. (2004). Jednoprzewodowe wielostrefowe urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne ze stałymi oraz zmiennymi strumieniami powietrza. Wentylacja, klimatyzacja, ogrzewnictwo, zdrowie. Materiały XV ogólnopolskiej konferencji naukowo-technicznej.
- Przydróżny, E., & Szczęśniak, S. (2013). Wyznaczanie gradientu temperatury powietrza w pomieszczeniach wysokich. *Rynek Instalacyjny*, 3, 22–25.
- Przydróżny, S., & Ferencowicz, J. (1988). Klimatyzacja. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
- Szczęśniak, S., Przydróżny, E., Pelech, A., & Walaszczyk, J. (2014). Rozkład temperatury powietrza w niewentylowanej hali technologicznej. W T. Traczewska & B. Kaźmierczak (Red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska: praca zbiorowa*. (T. 4). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Szczęśniak, S., & Sompoliński, M. (2011). Sposoby nawiewu powietrza do pomieszczeń o dużych wysokościach. In S. Anisimov (Ed.), *Współczesne metody i techniki w badaniach systemów inżynierskich* (pp. 187–189). Instytut Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska
- Szczęśniak, S., Stefaniak, Ł., Małyszko, M., Kanaś, P., & Michalak, W. (2023). Działanie wymienników do odzysku ciepła na tle zachodzących zmian klimatu. *Instal* 4(450). <https://doi.org/10.36119/15.2023.4.4>

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.

Czasopisma Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych w nowej odsłonie

Dołącz już dziś do grona specjalistów i otrzymuj bezpłatną prenumeratę czasopism PZITS.



Zapisz się na **bezpłatną** prenumeratę czasopism, a otrzymasz e-poradnik: „REHVA GB.32: Energetyczna renowacja budynków. Poradnik dla inżynierów HVAC”



Więcej szczegółów na stronie: www.pzits.pl/prenumerata



Dekarbonizacja systemów grzewczych poprzez zastępowanie grzałek elektrycznych źródłem biomasowym w instalacjach z pompą ciepła

Decarbonization of heating systems by replacing electric heaters with a biomass source in heat pump installations



Mgr inż. Ireneusz Bauma

ORCID ID: [0009-0009-6488-9308](https://orcid.org/0009-0009-6488-9308)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Poznańska

ireneusz.bauma@doctorate.put.poznan.pl

Słowa kluczowe: pompa ciepła, dekarbonizacja, wodór, H2 Ready, biwalentny system grzewczy, biomasa, pellet

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania pomp ciepła do dekarbonizacji systemów grzewczych poprzez zastępowanie grzałek elektrycznych źródłami odnawialnymi (gazowymi i biomasowymi). Omówiono aktualne uwarunkowania transformacji energetycznej w Polsce i Unii Europejskiej, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania gazu ziemnego, wodoru oraz biomasy w budownictwie indywidualnym. Dodatkowo zaprezentowano analizę techniczną biwalentnych systemów grzewczych opartych na pompach ciepła z dodatkowymi źródłami szczytowymi: kotłami elektrycznymi, gazowymi i biomasowymi (pellet drzewny). Zastosowanie biomasy w układach hybrydowych pozwala na dalsze ograniczenie emisji CO₂ przy zachowaniu wysokiej efektywności energetycznej pomp ciepła. Autor prezentuje również koncepcję kotła kondensacyjnego małej mocy na biomasę, opracowywanego w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”, który może zaistnieć w nowoczesnych systemach niskoemisyjnych.

Keywords: heat pump, decarbonisation, hydrogen, H2 Ready, hybrid heating system, biomass, pellets

Abstract

The article analyses the potential of heat pumps to support the decarbonisation of heating systems by replacing electric resistance heaters with gas-fired and biomass-based heat sources. It discusses the current conditions shaping the energy transition in Poland and the European Union, with particular emphasis on the use of natural gas, hydrogen, and biomass in individual residential buildings. In addition, a technical analysis is presented of bivalent heating systems based on heat pumps combined with supplementary peak-load heat sources, namely electric, gas-fired, and biomass-fired boilers using wood pellets. The use of biomass in hybrid systems enables further reductions in CO₂ emissions while maintaining the high energy efficiency of heat pumps. The article also presents a concept for a small-capacity biomass condensing boiler, currently being developed under Poland's "Implementation Doctorate" programme, which could serve as an auxiliary heat source in modern low-emission heating systems.

Wstęp

Podstawowym elementem walki z globalnymi zmianami klimatycznymi jest redukcja emisji dwutlenku węgla (CO₂) oraz innych gazów cieplarnianych (GHG – *ang. greenhouse gases*) do atmosfery. W odpowiedzi na zaostrzone regulacje środowiskowe, prowadzące do stopniowego wycofywania paliw kopalnych, w sektorze ogrzewnictwa coraz większego znaczenia nabiera integracja technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) z wysokosprawnymi systemami grzewczymi. W tym kontekście gaz ziemny pełni rolę paliwa przejściowego, a jego przyszłość coraz częściej związana jest z możliwością współspalania z wodorem lub zastępowania biometanem i biogazem (Ciupek i in., 2019; Rogowska & Pajda, 2020; Vakylabad i in., 2023; Salim i in., 2024).

Gaz ziemny stanowi obecnie dominujące paliwo w sektorze ogrzewania budynków w Unii Europejskiej (UE), odpowiadając za około 30,9% całkowitego zużycia energii.

W niektórych krajach, takich jak Holandia (66,2%), Włochy (49,8%), Węgry (49,2%) czy Luksemburg (46,2%), udział ten przekracza 40%. W konsekwencji sektor budynków w UE generuje około 34% emisji gazów cieplarnianych związanych z energią, przy czym znaczną część stanowią emisje wynikające z bezpośredniego spalania paliw kopalnych w systemach grzewczych. Szacuje się, że roczna emisja CO₂ w UE wynikająca z wykorzystania gazu ziemnego na cele grzewcze wynosi około 220 milionów ton (Lipiäinen i in., 2023).

W Polsce, zgodnie z dokumentem *Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku* (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021), planowana transformacja sektora grzewczego opiera się na rozwoju OZE oraz zastępowaniu nieefektywnych źródeł ciepła urządzeniami niskoemisyjnymi. Przykładowe dane Centralnej Ewidencji Emisyjności Budynków (CEEB) wskazują, że aż 56,08% budynków jednorodzinnych w kraju ogrzewanych jest paliwami stałymi (3 390 016 domów), z czego 46,85% wykorzystuje urządzenia niespełniające

Tabela 1. Udział źródeł ciepła w systemach ogrzewania stosowanych w Polsce (Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, 2026)
Table 1. The share of heat sources in heating systems used in Poland (Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, 2026)

Źródła ciepła	Liczba źródeł ciepła	Udział procentowy
Kocioł gazowy / bojler gazowy / podgrzewacz gazowy przepływowy / kominiek gazowy	4 914 184	28
Kocioł na paliwo stałe (węgiel, drewno, pellet lub inny rodzaj biomasy) z ręcznym podawaniem paliwa / zasypowy	2 889 587	16
Ogrzewanie elektryczne / bojler elektryczny	2 643 625	15
Kominiek / koza / ogrzewacz powietrza na paliwo stałe (drewno, pellet lub inny rodzaj biomasy, węgiel)	1 588 594	9
Kocioł na paliwo stałe (węgiel, drewno, pellet lub inny rodzaj biomasy) z automatycznym podawaniem paliwa / z podajnikiem	1 368 749	8
Miejska sieć ciepłownicza / ciepło systemowe / lokalna sieć ciepłownicza	1 089 582	6
Piec kaflowy na paliwo stałe (węgiel, drewno, pellet lub inny rodzaj biomasy)	1 057 225	6
Trzon kuchenny / piecokuchnia / kuchnia węglowa	836 479	5
Kolektory słoneczne do ciepłej wody użytkowej lub z funkcją wspomaganie ogrzewania	477 518	3
Pompa ciepła	421 140	3
Kocioł olejowy	134 553	1
Suma:	17 421 236	100

norm emisyjnych klasy 5. Szczegółowy udział poszczególnych źródeł ciepła przedstawiono w Tabeli 1.

Mimo rozwoju programów wsparcia, takich jak *Czyste Powietrze*, modernizacja systemów grzewczych w Polsce nadal napotyka na bariery techniczne i ekonomiczne. Niestabilność cen energii elektrycznej, gazu, węgla i pelletu w ostatnich latach utrudnia inwestorom wybór technologii grzewczych. Coraz większą uwagę zwracają zatem rozwiązania łączące pompy ciepła z dodatkowymi źródłami ciepła, tworząc biwalentne układy grzewcze, które łączą wysoką efektywność energetyczną z elastycznością eksploatacyjną.

Równolegle rozwija się koncepcja technologii *H₂Ready*, umożliwiającej częściowe zastąpienie gazu ziemnego wodorem. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1788 z dnia 13 czerwca 2024 r. dopuszcza mieszanie wodoru z gazem ziemnym, choć nie określa jednoznacznego stężenia referencyjnego. W poszczególnych krajach UE przyjęto różne limity: Niemcy – do 10% objętości, Francja – 6%, Austria – 4%, Szwajcaria – 2% (Lipiäinen i in. 2023).

Celem niniejszego artykułu jest ocena możliwości technicznych i środowiskowych integracji pomp ciepła z nowoczesnymi źródłami ciepła, w tym z kotłami gazowymi typu *H₂Ready* oraz kotłami biomasowymi, w kontekście dekarbonizacji ogrzewnictwa indywidualnego. Zakres badań wykonanych przez autora obejmuje ocenę perspektyw wdrożenia kondensacyjnego kotła biomasowego małej mocy współpracującego z pompą ciepła. Z punktu widzenia przemysłu grzewczego praca ma znaczenie praktyczne:

- wskazuje możliwości technicznego wykorzystania istniejących instalacji gazowych w systemach niskoemisyjnych,
- umożliwia optymalizację kosztów eksploatacyjnych poprzez zastąpienie energii elektrycznej innymi nośnikami, np. biomasą lub gazem z domieszką wodoru,
- stanowi podstawę do rozwoju krajowych rozwiązań w obszarze hybrydowych systemów *H₂Ready* i biomasowych układów kondensacyjnych, które mogą być produkowane w Polsce.

Analiza techniczna rozwiązań

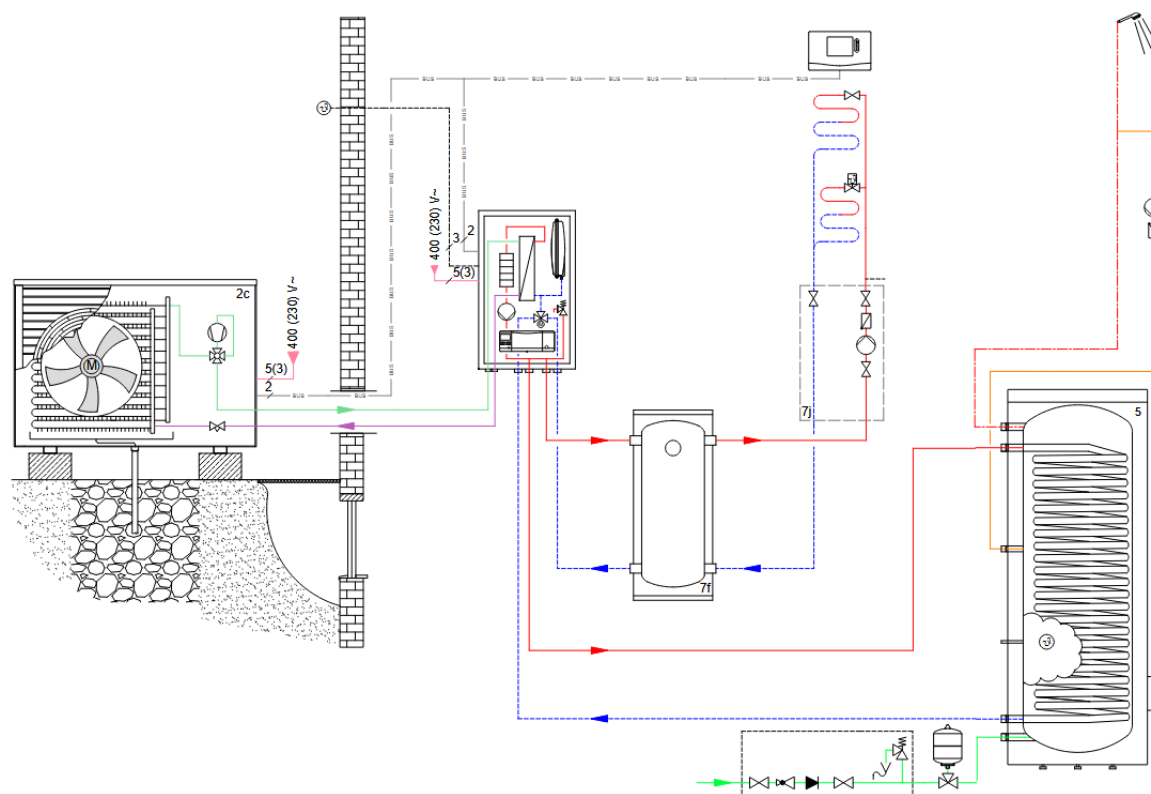
Biwalentne systemy grzewcze oparte na powietrznych pompach ciepła

Monowalentne systemy grzewcze, w których jedynym źródłem ciepła jest powietrzna pompa ciepła, charakteryzują się zmienną efektywnością pracy sprężarki w ciągu roku. Efektywność ta jest silnie uzależniona od warunków eksploatacyjnych, w tym od temperatury i wilgotności powietrza zewnętrznego. Z uwagi na konieczność zapewnienia komfortu cieplnego użytkownikom końcowym, w praktyce rynkowej powszechnie stosuje się biwalentne systemy grzewcze. W konfiguracji biwalentnej powietrzna pompa ciepła jest wspomagana przez dodatkowe źródło ciepła, najczęściej w postaci elektrycznej grzałki zintegrowanej z układem hydraulicznym jednostki wewnętrznej lub oddzielnego kotła elektrycznego.

Konstrukcyjne założenie dodatkowego źródła ciepła polega na wspieraniu lub zastępowaniu pracy pompy ciepła w sytuacjach, gdy system operuje poniżej temperatury biwalentnej. Niemniej istotną funkcją jest zapewnienie rezerwowego źródła ciepła w przypadku awarii jednostki zewnętrznej pompy ciepła, co gwarantuje ciągłość ogrzewania.

Pompa ciepła z grzałką lub kotłem elektrycznym

Elektryczne grzałki wspomagające (Rysunek 1.) charakteryzują się prostą integracją z systemami pomp ciepła. Jednakże ich eksploatacja wiąże się z wysokimi kosztami operacyjnymi, wynikającymi z rosnących cen energii elektrycznej. Ekonomiczne konsekwencje ich użycia są szczególnie dotkliwe dla inwestorów w przypadkach niedowymiarowania mocy pompy ciepła w stosunku do zapotrzebowania cieplnego budynku. W połączeniu z występowaniem niskich temperatur zewnętrznych i wysokiej wilgotności powietrza, skutkuje częstym uruchamianiem dogrzewania elektrycznego. Ponadto, zastosowanie grzałek elektrycznych, zwłaszcza w konfiguracji jednofazowej, może prowadzić do znaczącego obciążenia lokalnych sieci elektroenergetycznych, szczególnie w obszarach o wysokiej gęstości instalacji pomp ciepła podłączonych



Rysunek 1. Schemat hydrauliczny pompy ciepła z grzałką elektryczną (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)
Figure 1. Hydraulic diagram of a heat pump with an electric heater (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)

Tabela 2. Ceny gazu ziemnego TTF UE-Holandia w okresie 2010–2025 (Trading Economics)
Table 2. Natural gas prices TTF UE- Netherlands for 2010–2025 (Trading Economics)

Obecna	Poprzednia	Najwyższa	Najniższa	Jednostka
35,38	35,37	345,00	3,37	EUR/MWh

w analogiczny sposób. Nierównomierne obciążenie faz zasilających może skutkować przeciążeniem i awaryjnym wyłączeniem transformatorów dystrybucyjnych lub uruchomieniem zabezpieczenia głównej instalacji odbiorcy (np. ogranicznika prądowego o wartości 25 A) podczas pracy systemu w okresach charakteryzujących się niskimi wartościami temperatury zewnętrznej. Ponadto, w przypadku systemu elektroenergetycznego o wysokiej emisyjności, uruchamianie elektrycznego źródła szczytowego współpracującego z pompą ciepła zwiększa się zużycie energii elektrycznej, a tym samym pośrednią emisję CO₂ związaną z jej wytwarzaniem. Wielkość tej emisji zależy od aktualnego miksu energetycznego oraz emisyjności źródeł wykorzystywanych do pokrycia zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Pompa ciepła z kotłem gazowym

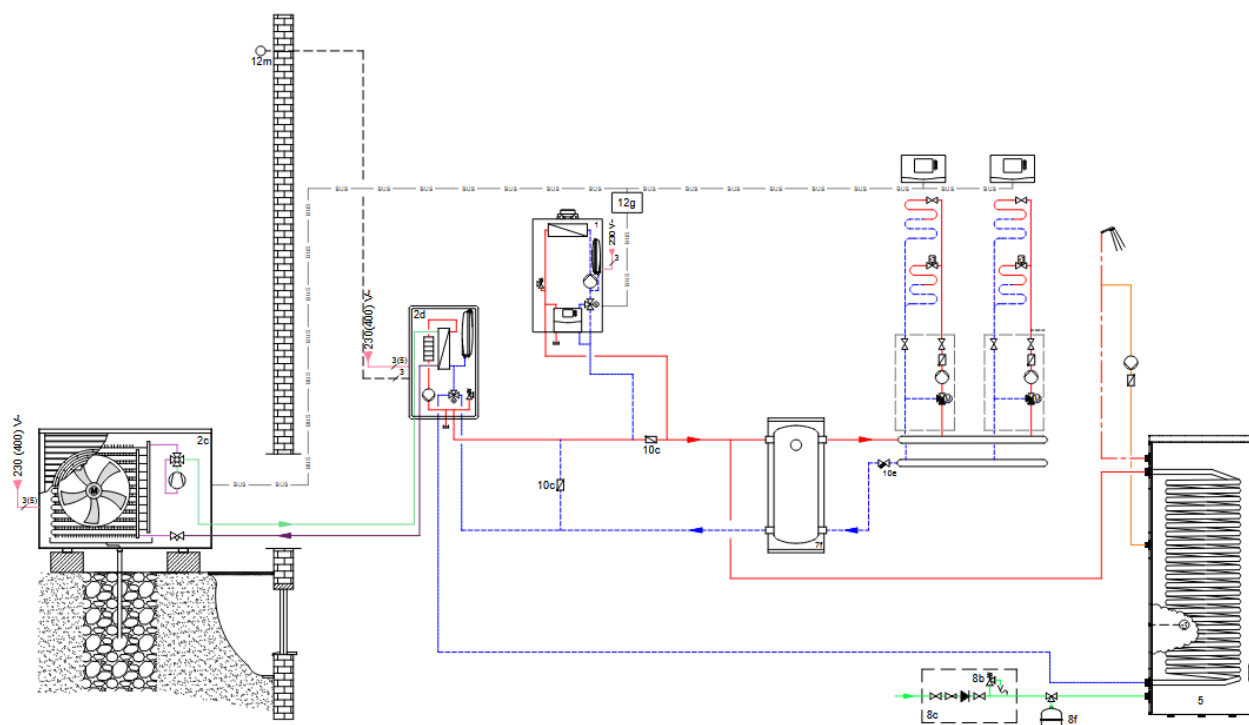
W latach 2021–2023 modernizacja systemów grzewczych w Polsce charakteryzowała się dominującym trendem zastępowania istniejących kotłów na paliwa stałe i kotłów gazowych starszej generacji pompami ciepła lub integrowania pomp ciepła z istniejącymi instalacjami hydraulicznymi. Rozwiązania te zyskały popularność na rynku wykonawczym przede wszystkim w odpowiedzi na ograniczoną dostępność oraz wzrost cen paliw kopalnych, takich jak węgiel kamienny, gaz ziemny i olej opałowy, wynikające m.in. z globalnych wydarzeń geopolitycznych i gospodarczych (Tabela 2.).

Aktualne rozwiązania prawne umożliwiają zwiększenie udziału energii odnawialnej poprzez dodawanie do gazu

ziemnego wodoru wytwarzanego z wykorzystaniem nadwyżek energii z OZE. Urządzenia oferowane przez producentów kotłów są oznaczane etykietą H₂-Ready lub PtG (ang. Power to Gas). Na Rysunku 2 przedstawiono hybrydowy układ pompy ciepła współpracującej z kotłem gazowym. Kocioł z otwartą lub zamkniętą komorą spalania będzie w tym układzie źródłem wysokotemperaturowym, natomiast kocioł kondensacyjny może pracować jako źródło niskotemperaturowe. W przypadku modernizacji układu kotłowego polegającej na dołączeniu powietrznej pompy ciepła w układzie zastosowano dodatkowy bufor ciepła.

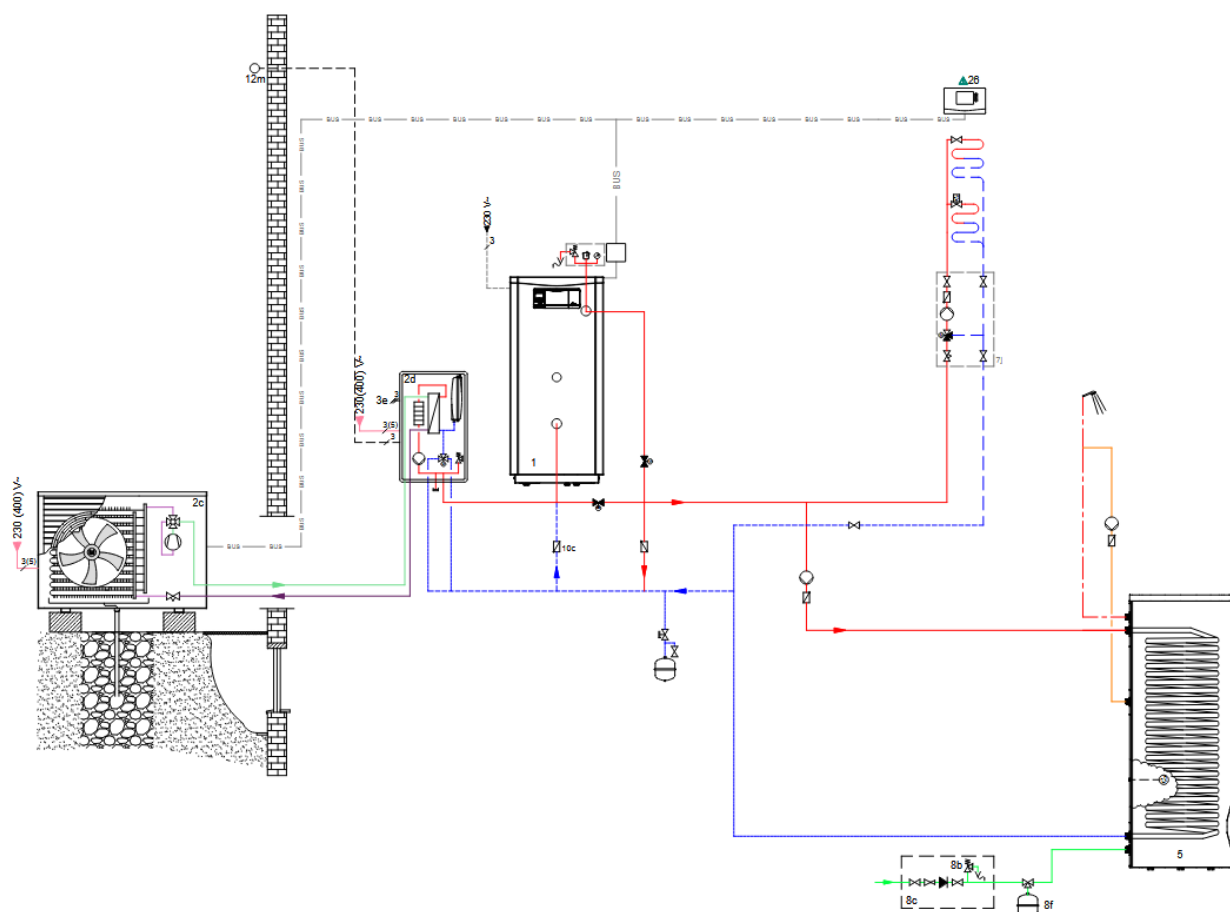
Tematyka wykorzystania wodoru wciąż pozostaje niedoceniana zarówno w technologii kotłów grzewczych, jak i w zastosowaniach przemysłowych. W aktualnych warunkach funkcjonowania krajowego systemu elektroenergetycznego, szczególnie w okresach wiosennych i jesiennych, obserwuje się częste ograniczanie pracy źródeł odnawialnych. W celu stabilizacji sieci operator systemu przesyłowego (PSE) jest zmuszony do czasowego ograniczania pracy instalacji wiatrowych i fotowoltaicznych z powodu nadpodaży energii elektrycznej.

W takich warunkach zasadne wydaje się wykorzystanie nadwyżek energii z OZE do produkcji wodoru, tzw. zielonego wodoru. Paliwo to, wytwarzane z wykorzystaniem energii wiatrowej i słonecznej, może być magazynowane pod ciśnieniem, a następnie wykorzystywane w okresach deficytu mocy w systemie – zarówno w ogniach paliwowych, jak i w turbinach gazowych czy kotłach przystoso-



Rysunek 2. Schemat hydrauliczny układu hybrydowego pompy ciepła z wiszącym kotłem gazowym (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)

Figure 2. Hydraulic diagram of a hybrid heat pump system with a wall-mounted gas boiler (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)



Rysunek 3. Schemat hydrauliczny układu hybrydowego pompy ciepła z stojącym kotłem gazowym (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)

Figure 3. Hydraulic diagram of a hybrid heat pump system with an existing gas boiler (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2024)

Tabela 3. Ceny pelletu drzewnego (Klasa ENplus A1). Źródło: opracowanie własne
Table 3. Wood pellets prices (Class ENplus A1). Source: authors' own study

Obecny	Poprzedni	Najwyższa	Najniższa	Daty	Jednostka
1265,00	1800,00	4000,00	600,00	2010 – 2025	PLN/t

wanych do jego spalania. Dzięki temu możliwe staje się nie tylko bilansowanie pracy sieci elektroenergetycznej, lecz także zapewnienie bardziej ciągłej i efektywnej pracy instalacji OZE w ciągu roku.

Z ekonomicznego punktu widzenia wytwarzanie i wykorzystanie wodoru może przynosić szereg korzyści. Ograniczenie emisji CO₂ pozwala zmniejszyć koszty związane z opłatami ETS i ETS2, a dodatkowo produkcja wodoru może stanowić źródło przychodów dla właścicieli instalacji energii odnawialnych. W skali gospodarstw domowych, przedsiębiorstw przemysłowych oraz całej gospodarki może się to przełożyć na obniżenie kosztu wytwarzania 1 kWh energii cieplnej.

Rozwój technologii wodorowych ma również strategiczne znaczenie dla bezpieczeństwa energetycznego kraju. Wodór, pełniąc funkcję nośnika i magazynu energii, może stanowić uzupełnienie niestabilnych źródeł odnawialnych. Jednocześnie stwarza możliwość wdrażania nowych rozwiązań technologicznych, takich jak kotły przystosowane do spalania czystego wodoru (np. systemy H₂GO), co wpisuje się w długofalową transformację sektora ciepłowniczego i elektroenergetycznego w kierunku zeroemisyjności.

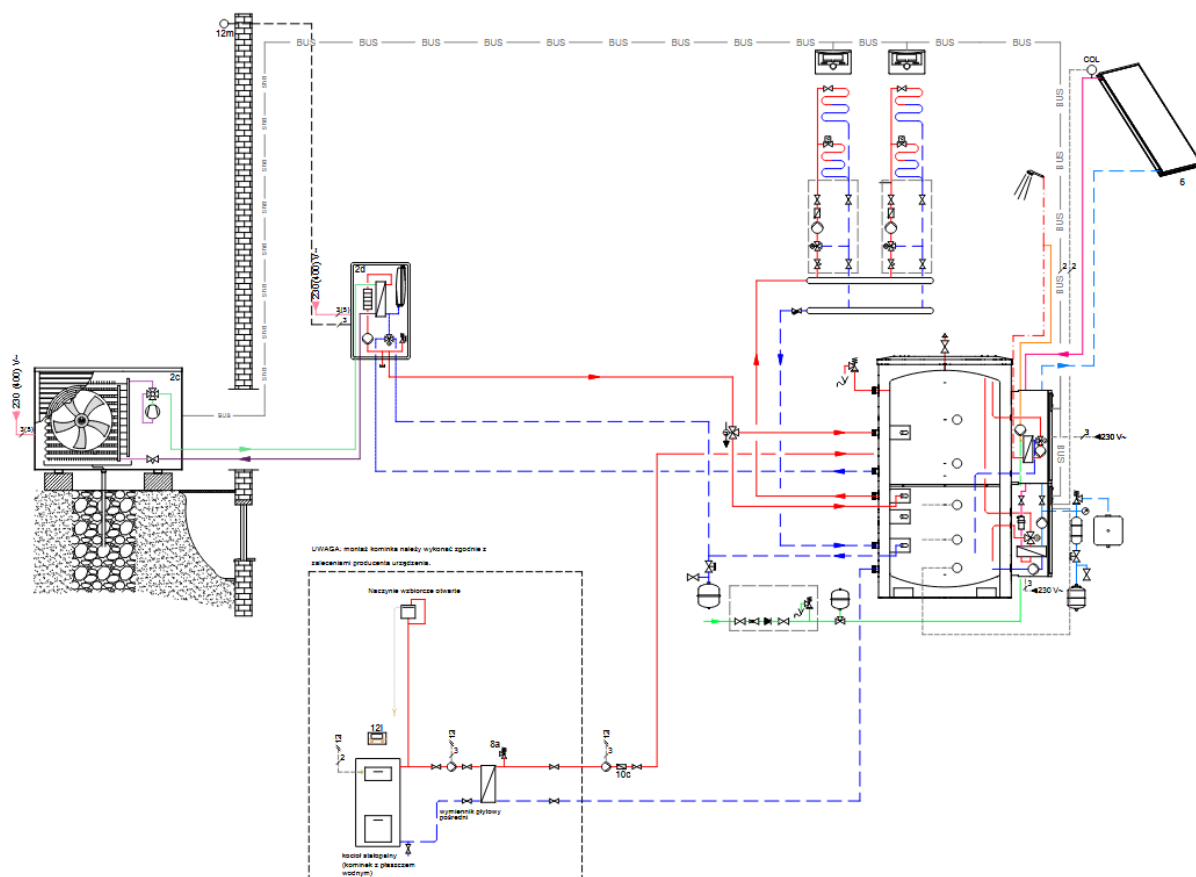
Na Rysunku 3 przedstawiono hybrydowy układ pompy ciepła współpracującej z kotłem gazowym. W tym przy-

padku kocioł kondensacyjny może pracować jako źródło niskotemperaturowe. W przypadku modernizacji układu kotłowego polegającej na dołączeniu powietrznej pompy ciepła wymiennik ciepła kotła o pojemności 80 litrów może pełnić funkcję bufora ciepła.

Pompa ciepła z kotłem na paliwo stałe spalającym pellet drzewny

Biomasa jest uznawana w Unii Europejskiej za odnawialne źródło energii. Przyjmuje się, że jej wykorzystanie energetyczne może charakteryzować się zbliżonym do zerowego bilansem emisji dwutlenku węgla w cyklu biogenicznym (Ciupek, 2023). Rośliny w okresie wzrostu pochłaniają dwutlenek węgla, który jest następnie uwalniany podczas ich spalania. Biomasa składa się najczęściej z celulozy, hemicelulozy, ligniny, pektyn, wosków i tłuszczów, natomiast analiza elementarna obejmuje oznaczenie zawartości takich pierwiastków, jak węgiel (C), wodór (H), tlen (O), azot (N), siarka (S) i chlor (Cl).

Ze względu na swój skład chemiczny biomasa jest paliwem o niższym stopniu uwęglania niż węgiel kamienny oraz węglowodory gazowe i ciekłe. W konsekwencji jej wartość opałowa jest istotnie niższa, co przekłada się na mniejszą gęstość energetyczną paliwa. Podczas spalania biomasy w kotłach grzewczych para wodna zawarta



Rysunek 4. Schemat hydrauliczny układu hybrydowego pompy ciepła z kotłem stałopalnym, elektrycznym i kolektorami słonecznymi (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2025)

Figure 4. Hydraulic diagram of a hybrid heat pump system with a solid fuel boiler, electric boiler and solar collectors (Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o., 2025)

w spalinach jest zazwyczaj odprowadzana bezpośrednio do komina, co uniemożliwia odzyskanie ciepła jej kondensacji.

Jednym z kierunków zwiększania sprawności cieplnej urządzeń biomasowych jest odzysk ciepła kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach. Analiza literatury (Ciupek, 2023) wskazuje, że dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na paliwach gazowych i ciekłych, co przyczyniło się do rozwoju kondensacyjnych urządzeń grzewczych zasilanych tymi paliwami. Prowadzone prace badawcze skupiały się przede wszystkim na optymalizacji wymiany ciepła poprzez udoskonalanie konstrukcji wymienników oraz dobór materiałów o odpowiednich właściwościach cieplnych i odporności na korozję.

Zmienność cen oraz dostępność paliw mają istotny wpływ na wybór technologii grzewczych przez użytkowników końcowych. W ostatnich latach zjawisko to dotyczyło również paliw biomasowych, w szczególności pelletu drzewnego, którego ceny wykazywały znaczną dynamikę zmian (Tabela 3).

Obecnie kotły na biomasę stosowane w domach jednorodzinnych są, ze względu na swoją konstrukcję, źródłami wysokotemperaturowymi, dlatego w układach hybrydowych mogą pełnić funkcję źródła szczytowego (rysunek 4). Parametry ich pracy są bardziej przewidywalne dzięki wymaganiom jakościowym dotyczącym paliw. *Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 8 maja 2025 r.* określa m.in. wymagania w zakresie wartości opałowej, zawartości popiołu oraz maksymalnej zawartości wilgoci w biomasie wprowadzanej do obrotu, wynoszącej 10% w stanie roboczym (Minister Klimatu i Środowiska, 2025). Obecnie na rynku nie są powszechnie dostępne urządzenia grzewcze małej mocy zasilane biomasą, w których proces kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach jest wykorzystywany do zwiększenia sprawności.

Kierunki dalszych prac rozwojowych

W ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” zostanie zaprojektowany, zbudowany i przebadany prototyp kotła kondensacyjnego małej mocy, o mocy cieplnej w zakresie 3–9 kW, zasilanego biomasą w postaci pelletu drzewnego. Wybór zakresu mocy urządzenia wynika z możliwości jego współpracy z pompą ciepła w charakterze źródła szczytowego – jest to rozwiązanie nowatorskie, dotychczas niestosowane na szeroką skalę przemysłową. W ramach pracy doktorskiej planowane jest przeprowadzenie badań mających na celu określenie:

- wpływu stopnia kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach ze spalania biomasy na intensywność wymiany ciepła oraz wartości współczynników przemian ciepła przez konwekcję i promieniowanie w kondensacyjnych kotłach na biomasę, przy temperaturze spalania poniżej 900°C;
- emisji substancji szkodliwych z kondensacyjnych kotłów na biomasę, m.in. C_xH_y , SO_2 , NO_x , CO i PM;
- wpływu stopnia kondensacji pary wodnej zawartej w spalinach na ilość wytrączanych pyłów.

Koncepcja kotła kondensacyjnego na pellet drzewny jako układu wspomagającego pompę ciepła

Praktyczne wykorzystanie ciepła utajonego w wymienniku kondensacyjnym kotła na biomasę stanowi zagadnienie o istotnym znaczeniu badawczym i aplikacyjnym. Celem prac jest zaprojektowanie układu spełniającego obowiązujące wymagania prawne, a jednocześnie zapewniającego stabilną i bezawaryjną pracę w zakładanym okresie eksploatacji.

Z punktu widzenia doboru materiałów konstrukcja wymiennika ciepła musi charakteryzować się odpornością na oddziaływanie środowiska o podwyższonej wilgotności, kwaśnym odczynie i wysokim zapyleniu. Warunki te istotnie komplikują proces projektowania ze względu na konieczność zastosowania materiałów odpornych na korozję chemiczną i oddziaływania termiczne. Jednocześnie geometria wymiennika powinna umożliwiać jego wykonanie w warunkach przemysłowych przy zachowaniu racjonalnych kosztów produkcji oraz konkurencyjnej ceny urządzenia.

Z perspektywy eksploatacyjnej istotne znaczenie ma uwzględnienie wilgotności paliwa. W przypadku pelletu drzewnego jej dopuszczalna wartość wynosi około 10%. W układach niskotemperaturowych zawartość wilgoci w paliwie wpływa na ilość pary wodnej w spalinach, a tym samym na możliwość odzyskania ciepła utajonego w procesie kondensacji. Zapewnienie stabilnych warunków tego procesu może również wpływać na powtarzalność parametrów emisji zanieczyszczeń podczas spalania pelletu wytwarzanego z biomasy o różnym pochodzeniu i składzie.

Projektowany wymiennik ciepła (kondensacyjny) musi jednocześnie spełniać wymagania norm dotyczących kotłów grzewczych, m.in. w zakresie mocy cieplnej, wytrzymałości mechanicznej i bezpieczeństwa eksploatacji. Charakter pracy urządzenia, obejmujący okresowe zmiany temperatury spalin oraz obciążenia cieplnego, wymaga optymalizacji parametrów konstrukcyjnych, takich jak grubość ścianek wymiennika i wymagana pojemność bufora ciepła.

Dodatkową zaletą proponowanego rozwiązania jest możliwość jego zastosowania w układach autonomicznych (ang. *off-grid*), również w warunkach długotrwałego braku zasilania z sieci elektroenergetycznej. Niewielkie zapotrzebowanie na energię elektryczną układu automatyki, zaworu mieszającego i pomp obiegowych umożliwia ich zasilanie z akumulatora przez czas zależny od ilości zgromadzonej w nim energii. Rozwiązanie to zwiększa niezależność energetyczną systemu oraz jego odporność na przerwy w dostawie energii elektrycznej.

Wnioski

Zastąpienie grzałki elektrycznej kotłem grzewczym, np. na pellet lub gaz ziemny, w hybrydowym systemie z pompą ciepła jest technicznie możliwe i może być ekonomicznie uzasadnione. Wymaga jednak starannego zaprojektowania systemu z uwzględnieniem lokalnej dostępności i cen paliw, zapotrzebowania na ciepło oraz aspektów środowiskowych.

Powietrzne pompy ciepła charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną, jednak przy bardzo niskiej temperaturze powietrza zewnętrznego mogą wymagać wsparcia dodatkowego źródła ciepła. Najczęściej funkcję tę pełnią grzałki elektryczne. Są one kompaktowe, łatwe w instalacji i szybko reagują na zmiany zapotrzebowania na ciepło, jednak ich użytkowanie może generować wysokie koszty, szczególnie przy rosnących cenach energii elektrycznej.

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie kotła na biomasę. Do jego zalet należą wysoka sprawność cieplna, możliwość ograniczenia emisji CO₂ w całym cyklu życia paliwa oraz praca w trybie automatycznym. Wadami tego rozwiązania są natomiast wyższe koszty inwestycyjne, konieczność zapewnienia miejsca do magazynowania paliwa oraz wykonania instalacji odprowadzania spalin.

Integracja kotła na pellet z układem hybrydowym może wymagać montażu lub wymiany bufora ciepła w celu zapewnienia właściwej współpracy źródeł, zastosowania układu automatycznego rozruchu i modulacji mocy, a także rozbudowy instalacji o system odprowadzania spalin. Badania wskazują, że hybrydowe systemy wyposażone w kotły na pellet mogą osiągać wyższą całkowitą efektywność energetyczną oraz niższą emisję CO₂ niż systemy wykorzystujące wyłącznie grzałki elektryczne. Zastosowanie układu odzysku ciepła ze spalin (ang. *flue gas heat recovery*) może dodatkowo zwiększyć efektywność energetyczną całego systemu.

Podziękowania

Badania te zostały sfinansowane ze środków Politechniki Poznańskiej przeznaczonych na działalność statutową. Numery grantów: 0712/SBAD/5297 i 0712/SBAD/5298.

Szkoła Podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za sfinansowanie doktoratu wdrożeniowego.

Szkoła serdeczne podziękowania Panu Stefanowi Żuchowskiemu, Vaillant Saunier Duval sp. z o.o., ul. Al. Jerozolimskie 195A, 02-222 Warszawa, za pomoc w przygotowaniu schematów technicznych instalacji pomp ciepła.

Bibliografia

- Ciupek, B. (2023). Kotły grzewcze na paliwa stałe. Wybrane aspekty budowy i eksploatacji, ISBN 978-83-7775-721-5, *Politechnika Poznańska*
- Ciupek, B., Judt, W., Urbaniak, R., & Kłosowiak, R. (2019). The Emission of CO and NO_x from Boilers Supplied by a Pellet Under the Influence of Changes in the Air-Fuel Equivalence Ratio. *Journal of Ecological Engineering*, 20(10), 34–38. <https://doi.org/10.12911/22998993/112748>

- Główny Urząd Nadzoru Budowlanego. (2026). Struktura źródeł ciepła [Dane z 21 lipca 2026 r.]. https://zone.gunb.gov.pl/pl/raporty/raport_zrodel_ciepla (Dostęp: 23.07.2025)
- Lipiäinen, S., Lipiäinen, K., Ahola, A., & Vakkilainen, E. (2023). Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(80), 31317–31329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283>
- Mertins, A., Heiker, M., Rosenberger, S., & Wawer, T. (2023). Competition in the conversion of the gas grid: Is the future of biogas biomethane or hydrogen? *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(83), 32469–32484. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.270>
- Minister Klimatu i Środowiska (2025). Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 8 maja 2025 r. w sprawie wymagań jakościowych dla biomasy pozyskanej z drzew i krzewów wprowadzanej do obrotu lub obejmowanej procedurą celną dopuszczenia do obrotu w postaci brykietu lub peletu. *Dziennik Ustaw*, poz. 618.
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2021). Polityka energetyczna Polski do 2040 r. <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski-do-2040-r> (Dostęp: 08.05.2025)
- Rogowska, D., & Pajda, M. (2020). Applications of sustainable biogas. *Nafta-Gaz*, 76(10), 750–756. <https://doi.org/10.18668/ng.2020.10.11>
- Salim, S. S., Luxembourg, S. L., Longa, F. D., & Van Der Zwan, B. (2024). Decarbonisation scenarios for the European residential sector. *Building and Environment*, 269, 112408. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112408>
- Trading Economics. Gaz ziemny UE – kurs, wykres, dane historyczne i aktualności. <https://pl.tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas> (Dostęp: 23.07.2025)
- Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o. (2024). Wykaz schematów typowych aroTHERM split. <https://www.vaillant.pl/podreczniki-schematow/pompy-ciepla/podrecznik-schematow-arotherm-split-2971996.pdf> (Dostęp: 23.07.2025)
- Vaillant Saunier Duval Sp. z o.o. (2025). Podręcznik schematów: Systemy wieloźródłowe. <https://www.vaillant.pl/podreczniki-schematow/pompy-ciepla/podrecznik-wielozrodlowy-09-10-2025-3073136.pdf> (Dostęp: 23.07.2025)
- Vakylabad, A. B., & Saberi, A. (2023). Application of hydrogen as a fuel in domestic appliances. *Elsevier eBooks*, 171–186. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-93940-9.00141-9>

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.



Wpływ zewnętrznych źródeł emisji azbestu na powietrze wewnętrzne eksploatowanych budynków

Impact of external asbestos emission sources on indoor air quality in occupied buildings



Dr Andrzej Obmiński

ORCID ID: 0000-0002-7190-1549

Zakład Fizyki Ciepłej Akustyki

i Środowiska

Instytut Techniki Budowlanej

a.obminski@itb.pl

Słowa kluczowe: włókna respirabilne azbestu, przenikanie pyłów, powietrze wewnętrzne i zewnętrzne, zanieczyszczenie

Streszczenie

Celem artykułu jest ilościowa ocena przenikania włókien azbestu z zewnętrznych źródeł do wnętrza, na podstawie bilansu zmian liczby włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym. Porównano, zanieczyszczenie powietrza wewnętrznego budynku z elewacją z płyt azbestowo-cementowych podczas: normalnej, bez destrukcyjnej eksploatacji poprzedzającej jej demontaż i w trakcie. Budynek był w ciągłym użytkowaniu. Oznaczenie koncentracji włókien azbestu prowadzono z użyciem mikroskopii optycznej kontrastu fazowego i polaryzacji światła oraz mikroskopii skaningowej SEM-EDS. Wynik badań określający transmisję włókien do wnętrza obiektu przedstawiono graficznie w formie trendów zmian koncentracji włókien azbestu w różnych etapach demontażu w pomieszczeniach nieużytkowanych i użytkowanych. Stwierdzono istotny wpływ emisji powstałej przy elewacji na powietrze wewnętrzne budynku. Powszechnie stosowane procedury izolowania budynku ograniczone do zamknięcia okien i uszczelnieniu ich taśmą są nieskuteczne w pomieszczeniach z aktywną wentylacją. W analizie zmian stężeń i ich interpretacji wykorzystano AI.

Keywords: respirable asbestos fibres, particulate matter infiltration, indoor and outdoor air, air pollution

Abstract

The aim of this study was to quantitatively assess the infiltration of asbestos fibres from outdoor sources into a building interior based on the mass balance of changes in airborne fibre concentrations in outdoor and indoor air. Indoor air pollution was compared in an occupied building clad with asbestos-cement panels under two conditions: during normal, non-destructive use prior to façade removal and during the removal process. The building remained continuously occupied throughout the study.

Airborne asbestos fibre concentrations were determined using phase-contrast and polarised-light optical microscopy, as well as scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The results describing fibre transmission into the building were presented graphically as trends in asbestos fibre concentrations at different stages of façade removal, both in occupied and unoccupied rooms.

Emissions generated in the immediate vicinity of the façade were found to have a significant impact on indoor air quality. Commonly used building-isolation procedures limited to closing windows and sealing them with adhesive tape proved ineffective in rooms with active ventilation. Artificial intelligence (AI) was used to analyse and interpret changes in fibre concentrations.

Wstęp

Powszechne wykorzystanie w przeszłości azbestu w gospodarce, sprawiło, że ten szkodliwy biologicznie składnik mineralny w sposób nadmierny kontaminuje obecnie środowisko budowlane, zwłaszcza powietrze wewnątrz budynków. W przypadku elewacji azbestowo cementowych (zwanych w skrócie *a-c*) lub elementów zewnętrznych w ścianach osłonowych dokonuje się naturalne uwolnienie włókien azbestu z degradowanej warunkami atmosferycznymi powierzchni. Związane z tym przenikanie włókien respirabilnych do wnętrza obiektu można traktować jako zjawisko analogiczne do przenikania pyłów PM 2,5 oraz o mniejszej średnicy do wnętrza budynku (średnica włókien respirabil-

nych $< 3 \mu\text{m}$). Jednym z elementów oceny transmisji cząstek azbestu do wnętrza jest współczynnik I/O (*indoor/outdoor*). Może on dać ogólne wrażenie na temat relacji między stężeniem cząstek w powietrzu wewnętrznym (ang. *indoor air*) i powietrzu zewnętrznym (ang. *outdoor air*). Wartość współczynnika I/O zmienia się pod wpływem wielu czynników co wskazuje, że relacja I/O nie jest w pełni przydatna w rozumieniu wzajemnej relacji tych cząstek i ich oddziaływania na powietrze wewnętrzne. Niektórzy autorzy uznają współczynniki infiltracji i penetracji jako bardziej zalecane do ocen przenikania pyłów zewnętrznych (Chen & Zhao, 2010). Jak wskazano w danych literaturowych, poziomy zanieczyszczeń powietrza na zewnątrz pozostają ważnym czynnikiem tzw. predyktorem zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego,

determinującym jego zanieczyszczenie w pomieszczeniach mieszkalnych (Meier i in., 2015). Aż ok 65% masy PM 2,5 w pomieszczeniach pochodzi z zanieczyszczenia cząstkami stałymi pochodzenia zewnętrznego (Bekierski & Kostyrko, 2021), natomiast współczynniki I/O dla PM10, PM2,5 i PM1 wynosiły w badaniach odpowiednio 0,54, 0,71 i 0,81 (Nadali i in., 2020). Potwierdza to tezę o wyższym, efektywnym przedstawianiu się ze źródeł zewnętrznych do wnętrza budynków cząstek o mniejszych średnicach niż cząstek o większej średnicy (PM10). Korelacja przenikających włókien respirabilnych azbestu z pyłami PM10 wydaje się nieistotna, ponieważ średnica liczonych włókien jest co najmniej 3 krotnie mniejsza od średnicy PM10. Nie ma też potwierdzonej takiej korelacji tych pyłów z włóknami w sąsiedztwie dużych powierzchni z płyt a-c (Gualtieri i in., 2009). Czy zatem włókna respirabilne azbestu uwalniane z wyrobów budowlanych odpowiadające frakcjom drobnym (PM 2,5 i 1) mogą przenikać do wnętrza zamkniętego budynku? Wiadomym jest, że wprowadzanie czystego powietrza zewnętrznego poprzez wentylację naturalną lub mechaniczną do środowiska wewnętrznego zmniejsza zanieczyszczenie powietrza wewnątrz pomieszczeń, jednak wprowadzenie słabej jakości powietrza zewnętrznego może zwiększyć stężenie cząstek stałych (Wallis i in., 2019). Analogiczny mechanizm można by odnieść do włókien azbestu uwzględniając utrudnienie powodowane wydłużeniem włókien w stosunku do ziaren izometrycznych. Elementem oceny obrazu zmian powietrza wewnętrznego jest jednoczesny pomiar liczbowy włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym. Korelacji takiej należy dokonać na przestrzeni czasu, obejmującego okres poprzedzający demontaż elewacji a-c oraz jego realizację, do czasu zakończenia lub zatrzymania tego procesu.

Zanieczyszczenie powietrza zewnętrznego otaczającego budynek i powietrza wewnętrznego, powodowane samą obecnością elewacji czy też pokrycia dachowego z płyt a-c w obiektach normalnie użytkowanych, o nieuszkodzonych wyrobach, często jest niewielkie (Wallis i in., 2019), tj. na granicy wykrywalności dla mikroskopii optycznej. Osiąga wartości ok. $< 300 \text{ wł./m}^3$. Stężenie takie mierzone technikami mikroskopii elektronowej w powietrzu wewnętrznym, nie różni się istotnie od powietrza atmosferycznego, tzw. tła (Lee & Orden, 2007) i jest określane w szerokim przedziale $< 100\text{--}500 \text{ wł./m}^3$ (Obmiński, 2022). Bardziej złożonym i dynamicznym procesem uwalniania włókien azbestu od wietrzenia takich wyrobów jest ich destrukcja mechaniczna, powstała w trakcie uszkodzeń powodowanych demontażem. Chwilowo może prowadzić do bardzo dużych stężeń w pobliżu źródła emisji. Wartości stężeń mogą przekraczać nawet NDS (Lange & Thomulka, 2000; Dumortier & De Vuyst, 2011; Craighead i in., 2008). Według danych literaturowych wartości stężeń włókien azbestu rejestrowane w pomiarach indywidualnego narażenia pracowników podczas usuwania płyt a-c w strefie oddychania pracowników może zawierać się ono w przedziale $100\ 000\text{--}400\ 000 \text{ wł./m}^3$ (Brown, 1987; Kako-oei & Normohammadi, 2013). Rejestrowano wartości nawet do $3\ 000\ 000 \text{ wł./m}^3$ (Dufrense i in., 2009). W szczególnych okolicznościach (podczas eksploatacji budynku) stwarza to realne ryzyko przenikania tak dużej koncentracji włókien do wnętrza. Sygnalizowany problem nabiera szczególnego znaczenia wobec współczesnych wymagań prac termoizolacyjnych budynków związanych „Zielonym Ładem”, który przyspiesza i powiększa liczbę remontowanych budynków

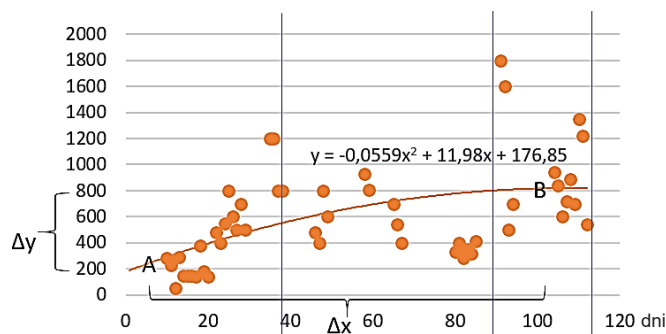
z elewacjami a-c. Problem ten znalazł wyraz w nowelizacji przepisów UE, w przedmiocie poprawy bezpieczeństwa osób niezwiązanych zawodowo z narażeniem na azbest (Dyrektywa „azbestowa” Parlamentu UE nr 2023/2668 z 2023 r.).

Metodyka badań

W celu oceny oddziaływania demontażu elewacji a-c na wewnątrz budynku porównano wartości stężeń na zewnątrz i wewnątrz budynku, zmierzone w tym samym okresie i lokalizacji w budynku w poszczególnych odcinkach czasu. Na podstawie zmian stężeń włókien w powietrzu możliwe jest określenie zmiennej „y” w funkcji zmiennej – czasu, „x”, w której efekt tej zamiany nastąpił. Pominąć można dla uproszczenia charakter i rodzaj przenikania, (nieszczelności, wentylacja, reemisja włókien przenikniętych wcześniej), analizując sumę efektu tych czynników. Ilustruje to w uproszczeniu rysunek zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu wewnętrznym pomiędzy punktami rozpoczęcia demontażu „A” i jego zakończenia „B”, gdzie przyrostowi czasu Δx (w dniach prowadzonego remontu) odpowiada przyrost stężenia włókien w powietrzu wewnętrznym Δy . Na Rysunku 1 przedstawiono rzeczywiste wartości zmierzonych stężeń. Średnią ich zmianę określa nieliniowa funkcja trendu zmian; jest to funkcja wykładnicza, ale w różnych obiektach może być inną, dopasowaną do cech przyrostu zanieczyszczeń zewnętrznych, poziomu stężeń włókien w powietrzu otaczającym obiekt, ilości wymian powietrza itp. Prace ilustrujące ten remont wg. Rysunku 3 trwały przez około 120 dni, z przerwą pomiędzy 40 i 80 dniem, liczoną od rozpoczęcia robót. Opis zmian powietrza wraz z różnymi modelami tych zmian szczegółowo zostały omówione w dalszej części artykułu.

Podstawową metodą dla prowadzenia analiz ilościowych stężenia włókien azbestu były mikroskopia optyczna, kontrast fazy (dla rejestracji włókien), skojarzona z polaryzacją światła (dla ich identyfikacji). Metoda została opracowana w ITB, walidowana i wykorzystywana jest w laboratorium pod nr. PBLIS-020/1/08-2006. Zakres oznaczeń wynosi $300\text{--}200\ 000 \text{ wł./m}^3$, niepewność ok 20% wyliczana na podstawie wartości wejściowych za pomocą programu ProWL. Metoda oznaczeń koncentracji włókien była stosowana równolegle z badaniem normowym SEM-EDS (ISO, 2019). Pobór próbek zrealizowano wg standardu (ISO, 2007). Pobór powietrza odbywał się na wysokości ok 1,5 m od podłoża, przy czasie pojedynczego poboru 1,5–3 godz. przepływie ok 8 l/min i objętości powietrza przechodzącego przez filtr zależnej od optymalnego obciążenia filtrów ok 1,5–3 m³.

Wszystkie wyniki dla lepszego obrazowania zamian stężeń włókien azbestu zostały przedstawione w formie graficznej. Wspomniany trend zmian pozwala na modelowanie stanu zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego w dowolnym etapie procesu, wyznaczenie czasu, w którym zanieczyszczenie zostanie z budynku usunięte lub określenie jakie warunki powinny być do tego spełnione (np. wielkość wymian powietrza lub ograniczenie poziomu zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego). Dane empiryczne zgromadzone w badaniu monitorującym budynek pozwalają na wykorzystanie AI w tworzeniu modeli predykcyjnych, które umożliwią określenie, w jakich warunkach wyroby i proces ich usunięcia powodować będzie określone skutki.



Rysunek 1. Trend zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu wewnętrznym spowodowany demontażem elewacji a-c w budynku. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. Trend in indoor airborne asbestos fibre concentrations caused by the removal of the asbestos-cement façade from the building. Source: author's own study



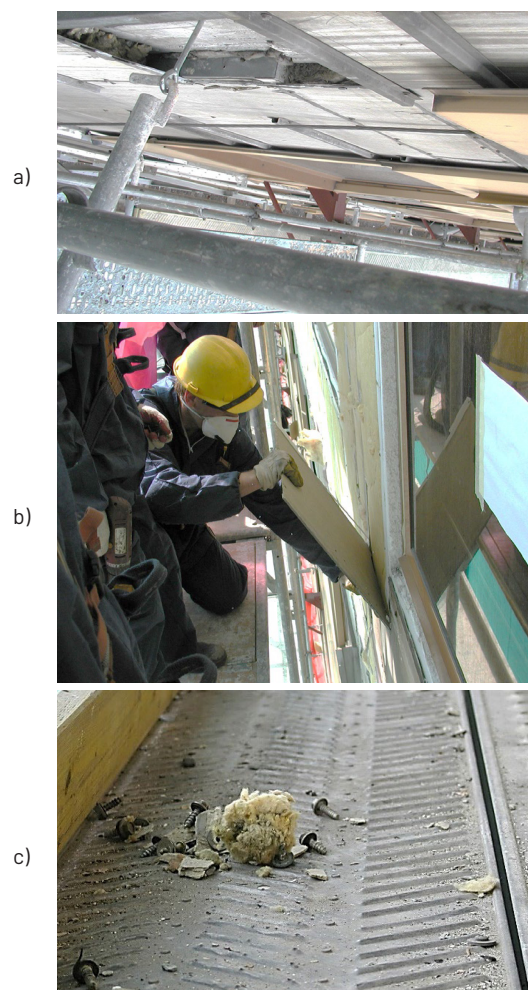
Rysunek 2. Etapy zabezpieczenia i demontażu elewacji. Brak izolacji strefy pracy od zewnątrz przedstawia (a, b). Wnętrze strefy pracy przedstawia (c, d). Brak hermetycznej strefy pracy skompensowano miejscowym odsysaniem powstających pyłów widocznym na (c). Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Stages of securing and dismantling the façade. No separation of the work zone from the outdoor environment is shown on (a, b). Interior of the work zone is shown on (c, d). The absence of a hermetically sealed work zone was compensated for by local extraction of the generated dust visible on (c). Source: author's own study

Materiał badawczy

Badanie dotyczyło dwóch budynków, podczas prac robótково-remontowych, których zmiany zanieczyszczenia w powietrzu przedstawiono na rysunkach:

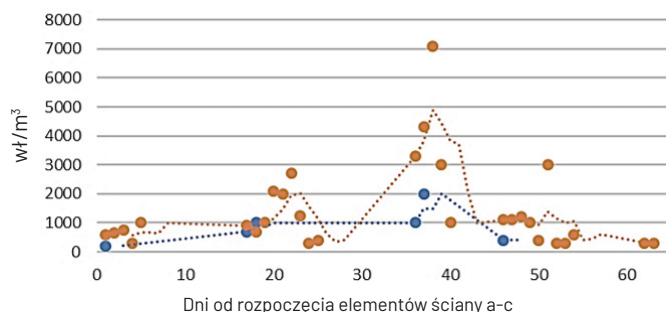
- Rysunek (4), to uproszczony model dynamicznych średnich zmian powietrza zewnętrznego i wewnętrznego w budynku wielopiętrowym, w którym usuwano elewację i części ściany osłonowej (z płyty warstwowej PW3/A). Ulegał on rozszczelnieniu, co manifestuje się gwałtownym skokiem stężenia włókien w powietrzu wewnętrznym ok 40 dnia robót.
- Rysunek 5 (a-d), przedstawia modele o różnej dynamice zmian stężenia włókien azbestu w budynku, w którym usuwano wyłącznie samą elewację z płyt a-c, bez rozszczelnienia ściany zewnętrznej. Model statyczny dla



Rysunek 3. Demontażu elewacji i zewnętrznych płyt a-c w monitorowanym obiekcie. Oznaczenia: (a) mocowanie rusztowania, widoczne podesty, fragmenty ściany z osłoną płyt a-c panelami z blachy, (b) łamanie demontowanych płyt (wąski podest uniemożliwia ich demontaż bez destrukcji), (c) podest po zakończeniu dnia pracy. Źródło: opracowanie własne

pomieszczeń eksploatowanych, mieszkalnych to rys. (b). Modele dynamiczne tych samych pomieszczeń, przedstawiające zmiany chwilowe to (c) i (d). Wykres rys. (d) jest uproszczoną wersją rysunku (c), która redukuje wahania stężeń do dwóch głównych epizodów emisji. Przez co wyraźnie widać nakładanie się zmian powietrza wewnętrznego na zmiany w powietrzu zewnętrznym. Dla porównania model dynamiczny pomieszczeń nieeksploatowanych przedstawiono na rys (a).

Analizowany budynek, w którym usuwano elewację i zewnętrzne części ściany osłonowej bez rozszczelnienia obiektu to wielopiętrowy budynek mieszkalny, podobny do przedstawionego na Rysunku 2b. Budynek wyposażony był w wentylację mechaniczną. Prace prowadzono bez izolowania strefy robót. Okna w budynku były zamknięte a sam obiekt był użytkowany przez jego mieszkańców, co jest normą w tego typu pracach prowadzonych na dużych osiedlach mieszkalnych. Monitoring pomiarów, tak jak prowadzone prace, podzielony był na trzy fazy:



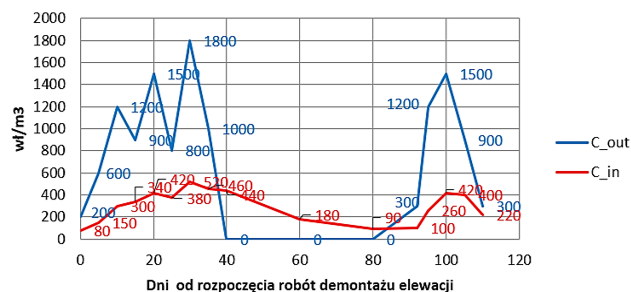
Rysunek 4. Demontaż ścian z płytami a-c w formie płyt warstwowych PW3/A w budynku rozbieranym. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Dismantling of walls containing PW3/A asbestos-cement sandwich panels in the building under demolition. Source: author's own study

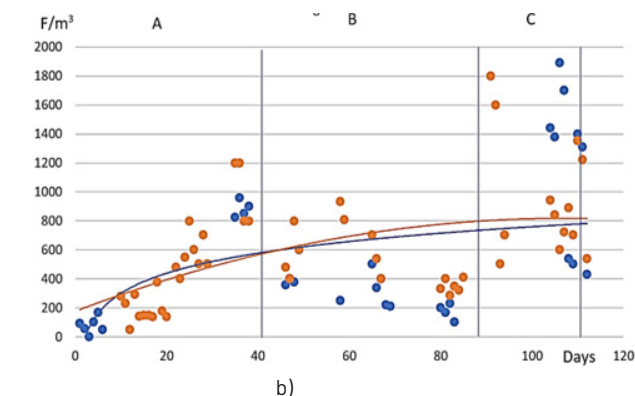
- „A” – wstępne naruszenie płyt azbestowo – cementowych podczas montowania rusztowań do ściany budynku i częściowe usunięcie osłaniających ścianę blach. Prace wstępne trwały ok 40 dni.
- „B” – przerwa w pracach i przygotowanie do dalszych robót, zakończona w 80-tym dniu od rozpoczęcia badań.
- „C” – wznowienie robót: demontaż osłon blaszanych i zamocowanych pod mini płyt a-c.

Całkowita powierzchnia płyt a-c wynosiła ok. 7350 m², kubatura budynku ok. 15 000 m³. Badania nie objęły całości prac usuwania płyt a-c i zakończyły się w 120 dniu od rozpoczęcia pomiarów.

Pobór próbek powietrza zewnętrznego odbywał się na podestach rusztowań, z których usuwano elewację. Na



a)



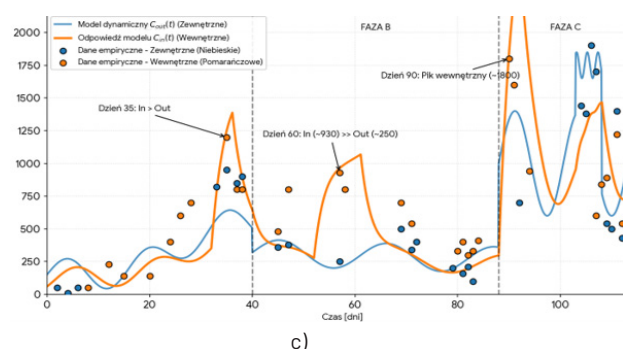
b)

Rysunkach 2a-d widoczne są typowe rozwiązania omawianej technologii usuwania elewacji a-c bez izolowania strefy prac od otoczenia, jednak tu, nie tak jak na rys. 3, w analizowanym obiekcie prowadzono je z użyciem miejscowego odsysania pyłów wysoko wydajnym odkurzaczem przemysłowym z filtrem HEPA. Analizowany obiekt był osłonięty z siatką budowlaną podobnie jak przedstawiono na Rysunku 3. Płyty a-c były łamane a podczas usuwania nie stosowano miejscowego odsysania odkurzacza- mi uwalnianych włókien azbestu z demontowanych płyt.

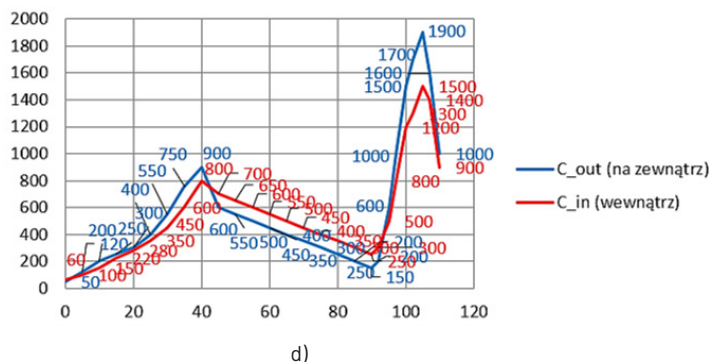
Wyniki badań i dyskusja

Rysunek 4 przedstawia uproszczony model dynamiczny zmian stężenia włókien w przypadku usuwania całych ścian PW3/A. Krzywa łamana obrazuje wzrost zanieczyszczenia wewnątrz budynku wskutek sukcesywnego rozszczelniania jego ścian zewnętrznych. Względnie niskie wartości stężenia włókien w powietrzu zewnętrznym w strefie pracy (pomiaru obszarowe prowadzone w strefie prac na zewnątrz budynku), wynoszące 500–2000 wł./m³, korespondują z wyraźnym wzrostem stężenia włókien wewnątrz budynku – do poziomu 2000–7000 wł./m³ – po rozszczelnieniu przegrody budowlanej. Wynika to, z jednej strony, z rozpraszania włókien w otwartej przestrzeni prowadzenia robót, a z drugiej – z kumulacji tych pyłów wewnątrz budynku, gdzie możliwość rozpraszania się włókien jest ograniczona.

Na Rysunkach 5a-d przedstawiono zmiany stężenia włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym podczas usuwania elewacji oraz zewnętrznych płyt ściany



c)



d)

Rysunek 5. Korelacja zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym w budynku podczas usuwania wyrobów zawierających azbest ze ściany zewnętrznej. Oznaczenia: (a) badanie w pomieszczeniach nieużytkowanych (wyłączenie wentylacji, zamknięcie wszystkich otworów wentylacyjnych, (b-c-d) demontaż elewacji w budynku, pomiary prowadzone w mieszkalnych pomieszczeniach użytkowanych z zamkniętymi oknami, przy czym (b) przedstawia model statyczny, (c i d) przedstawiają modele dynamiczne na podstawie równań różniczkowych. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Correlation between changes in asbestos fibre concentrations in outdoor and indoor air during the removal of asbestos-containing materials from the building's external wall. Key: (a) measurements in unoccupied rooms, with the ventilation switched off and all ventilation openings sealed; (b-d) façade dismantling, with measurements conducted in occupied residential rooms with closed windows; (b) static model; (c, d) dynamic models based on differential equations. Source: author's own study

osłonowej, przy zamkniętych oknach uszczelnionych taśmą. Wartości stężenia włókien azbestu w powietrzu są takie same jak na Rysunku 1, z rozróżnieniem powietrza zewnętrznego (kolor niebieski) i wewnętrznego (kolor pomarańczowy). Stężenie włókien w powietrzu zewnętrznym zmienia się dynamicznie, zależnie od chwilowych warunków pogodowych, w zakresie od 0 do 1890 wł./m^3 .

Na Rysunkach 5a–d przedstawiono różne modele zmian w powietrzu wewnętrznym (a) pomieszczeń ściśle zamkniętych pomieszczeń technicznych, nie wentylowanych, nie użytkowanych lub (b, c, d) lokali mieszkalnych (w tym samym budynku), których hermetycznie zamknąć nie można, ponieważ przebywają w nich ludzie (wchodzą/wychodzą z budynku, działa wentylacja itd.).

Średni przyrost włókien w powietrzu wewnętrznym na przestrzeni badanego okresu 110 dni, wynosił 600 F/m^3 , przy zarejestrowanym wzroście koncentracji w powietrzu zewnętrznym 750 F/m^3 . Oznacza to, że w pomieszczeniach mieszkalnych nastąpił wzrost zanieczyszczenia zbliżony do tego, który rejestrowana na zewnątrz (bardzo słaba ochrona mieszkańców). Jednak w krótkich okresach ok 20 dni wzrosty mogły wynosić nawet 1500 wł./m^3 . Przykład stałego, średniego wzrostu na przestrzeni długiego okresu, stanowi bezpośredni dowód na przenikanie do wnętrza budynku pyłów z jego otoczenia mimo zamknięcia i uszczelnienia okien. Przedłużający się proces uwalniania włókien azbestu w bliskiej przestrzeni badanego budynku skutkuje wzrostem zanieczyszczenia w jego otoczeniu. Wyjaśnia to Rysunek 3c, na którym widać, że przyrost zanieczyszczenia w otoczeniu budynku przekłada się na zmiany zanieczyszczenia w jego wnętrzu, ponieważ w użytkowanym obiekcie cały czas działa wentylacja mechaniczna, a więc pobierane jest powietrze z otoczenia. Choć stężenie włókien w nieszczelnych, „otwartych” strefach pracy maleje wskutek rozpraszania się pyłów, odbywa się to kosztem otoczenia, do którego transferowane są te pyły. Z tej przyczyny, rutynowo mierzone stężenia, tzw. „obszarowe” w odległości ok. 5–10 m, od wykonawców były niższe od pomiarów tzw. indywidualnych (80 000 wł./m^3) a te z kolei niższe danych literaturowych, podających wartości z hermetycznych stref

pracy (dane literaturowe). Zestawienie danych zmian stężenia przedstawia Tabela 1.

Ponadto:

- Pomiary prowadzone wewnątrz budynku, w pomieszczeniach wyłączonych z użytkowania (Rysunek 5a) wskazują, że wzrost zanieczyszczenia wnętrza jest skorelowany ze wzrostem zanieczyszczenia zewnętrznego, ale jest łagodny w porównaniu ze zmianami zewnętrznymi. Znaczące osłabienie wzrostu. Wiązać go należy z ogólnym wzrostem zanieczyszczenia całego budynku przy działającej w nim wentylacji i nieczynnej wentylacji w badanych pomieszczeniach.
- Chmura punktów stanowiąca materiał empiryczny z pomiarów powietrza zewnętrznego i wewnętrznego pomieszczeń mieszkalnych (Rysunek 5b) wykazuje stały wzrost zanieczyszczenia, przedstawiony funkcją nieliniową. Statystyczne uśrednienie wartości poszczególnych pomiarów przedstawiają linie trendu w powietrzu zewnętrznym (niebieski wykres) i wewnętrznym (pomarańczowy wykres). Trend pokazuje zmianę średnią w długim okresie czasu, jest modelem statycznym bez uwzględnienia lokalnych, krótko terminowych wahań stężenia. Stanowi argument za koniecznością wdrożenia procedur ochronnych na kolejnych budowach. Pokazuje „ogólny obraz” do raportów środowiskowych, gdzie kluczowy jest ogólny wniosek: „Im dłużej trwają prace, tym wyższe jest bazowe tło zanieczyszczeń”. Świadczy to o niezadowalającej jakości zastosowanej techniki zabezpieczenia budynku i samych prac, co widać na Rysunku 3b). Pozwala również ocenić skumulowane ryzyko zawodowe (np. dla celów BHP) w skali całego projektu.
- Dynamiczny model zmian uzyskany z równań różniczkowych opartych na danych empirycznych (rysunek 5c) wygładził załamania linii, wprowadzając fizyczny czynnik opóźnienia czasowego oraz bezwładności systemu, stąd na rysunku piki powietrza wewnętrznego były przesunięte w czasie względem pików powietrza zewnętrznego i miały charakter „falowy”. Model dynamiczny ma zastosowanie w projektowaniu inżynierskim, np. w projektowaniu systemów wentylacji – ponieważ model uwzględ-

Tabela 1. Zmiany stężenia z uwzględnieniem trendu globalnego. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Changes in concentration accounting for the global trend. Source: author's own study

Punkt kontrolny cyklu badawczego (110 dni)	Outdoor air (niebieski wykres)	Indoor air (pomarańczowy wykres)	Interpretacja
Stan wyjściowy	~ 200	~ 160–300	Początek prac, naturalne tło zewnętrzne
Koniec Fazy I (Dzień 40)	1200	900	Maksymalne stężenie przy dziennym sunięciu ok 70 m^2 elewacji
Zrównanie wartości linii trendów (dzień 40)	~ 580–600	~ 580–600	Symbioza środowiskowa*
Faza II – Przerwa (Ok. Dnia 60)	~200–300	~ 350	Inwersja stężeń: Wiatr oczyszcza powietrze zewnętrzne; wnętrze akumuluje pył azbestowy.
Koniec Fazy B – Przerwa (Dzień 80)	~200	350	Punkty kontrolne przed wznową robót
Faza III	~ 500–700	1600–1800	Reemisja: (Wydychanie pyłu osiadłego w kanałach HVAC)
Maksima stężeń (Dni 105–108)	1900	~ 900–1300	Krótką intensyfikacja prac demontażowych
Koniec badania (Dzień 110)	~ 430	~ 540	Redukcja zanieczyszczeń, końcowe opadanie pyłów, przewietrzanie obiektu

*Stan pełnej integracji i dynamicznej równowagi pomiędzy mikroklimatem wewnętrznym budynku a środowiskiem zewnętrznym (parametry powietrza wewnątrz stają się bezpośrednią funkcją stanu powietrza na zewnątrz, brak izolacji ludzi od zagrożeń zewnętrznych. strumień masy włókien azbestu infiltrujących do budynku ($\dot{A}pN_{out}$) idealnie równoważy strumień cząstek usuwanych przez wentylację i depozycję grawitacyjną. Punkt oznacza on osiągnięcie pełnej równowagi aerodynamicznej i masowej pomiędzy strefą indoor a outdoor, w wyniku czego kubatura budynku wysokościowego traci swoje właściwości osłonowe względem pyłów.

nia przesunięcia fazowe (opóźnienia) i fizyczną bezwładność powietrza, pozwala inżynierom obliczyć, jak szybko systemy wentylacyjne muszą reagować na piki emisji na zewnątrz. Może zostać zaimplementowany w systemach zarządzania budynkiem (BMS), ponieważ pozwala systemowi sterowania przewidzieć zmienność czynnika szkodliwego (np. „Jeśli stężenie na zewnątrz wzrosło o X, to za Y godzin wewnątrz osiągniemy punkt krytyczny, więc należy zamknąć czerpnię powietrza” - pozwala określić lokalne zagrożenia dla użytkowników budynku).

- Uproszczony łamany, model dynamiczny (odcinkowy), oparty bezpośrednio na interpolacji liniowej kluczowych punktów pomiarowych różnych etapów pracy dla stężenia zewnętrznego (C_{out}) – linia niebieska) i wewnętrznego (C_{in}) – linia czerwona (Rysunek 5d) stanowi uśrednione odzwierciedlenie makro-trendów, z wyraźnym przesunięciem w czasie zanieczyszczeń wewnętrznych względem źródłowego, zewnętrznego. Wykres rezygnuje z gładkich krzywych trendu, przedstawiony na Rysunku 5b oraz z fizycznych oscylacji tłumionych (Rysunek 5c), na rzecz prostoliniowych przejść między uśrednionymi ekstremami w kluczowych dniach z rejestracją piku stężeń włókien wewnątrz budynku ok. dnia 40 i 100. Pozwala na reakcję na konkretne zdarzenia zaplanowanie przerwy, modyfikacje procedur w pracy lub nakazanie użycie masek dla wykonawców.

Porównanie wykresów zmian powietrza w pomieszczeniach (a) i (b-d) przynosi istotne wnioski co do penetracji cząstek do wnętrza budynku ze względu na użytkowanie pomieszczeń przedstawione w Tabeli 2.

Analizę zmian koncentracji włókien azbestu w czasie, opisuje równie różniczkowe (1).

$$dC_{in}/dt = a C_{out}(t) - b C_{in}(t) \quad (1)$$

gdzie:

- C_{indoor} – stężenie wewnątrz (punkty pomarańczowe zgodnie z Rysunkiem 5c), $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- $C_{outdoor}$ – stężenie na zewnątrz (punkty niebieskie zgodnie z Rysunkiem 5c), $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- t – czas, dni
- $C_{out}(t)$ – chwilowe stężenie zewnętrzne, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- $C_{in}(t)$ – chwilowe stężenie wewnętrzne, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- a – szybkość przenikania włókien do wnętrza, $a = P \lambda$
- b – skuteczność usuwania $= \lambda + k$
- P – współczynnik penetracji (0–1) część przenikają-

ca do wnętrza z zanieczyszczenia zewnętrznego

- λ – wymiana powietrza, h^{-1}
 - k – tempo usuwania niewentylacyjnego (depozycja/filtracja) szybkość, z jaką pył samoistnie znika z powietrza wewnątrz, h^{-1} , $k = b - \lambda$
 - $a C_{out}(t)$ – tempo napływu do wnętrza zależne od stężenia zewnętrznego
 - $b C_{in}(t)$ – tempo usuwania włókien zawieszonych wewnątrz
- Średnia zmiana powietrza wewnętrznego w wybranym przedziale czasu przedstawiona jest na równaniu (2).

$$dC_{in}/dt = C_{in}(t_{end}) - C_{in}(t_{start}) / t_{end} - t_{start} \quad (2)$$

t_{end} i t_{start} oznaczają punkty w czasie, między którymi mierzone zmiany stężenia:

- t_{start} (czas początkowy): Moment, w którym zaczęto pomiar stężenia
 - t_{start} (czas końcowy): Moment, w którym go zakończono.
- Spadek stężenia w zamkniętym budynku w warunkach braku emisji zewnętrznej ma charakter wykładniczy, zgodny z równaniem (3).

$$C_t = C_0 \cdot e^{-(k + \lambda)t} \quad (3)$$

gdzie:

- $C(t)$ – stężenie pyłu wewnątrz budynku po czasie t , $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- C_0 – stężenie początkowe, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- λ – całkowity współczynnik zaniku pyłu (wymiana powietrza + sedimentacja na powierzchniach)

Opierając się na spadku stężeń podczas przerwy w pracy w dniach 40–80 i wykorzystując wartości pomiarowe w fazie wstrzymania robót (wprowadzono wzór nr 4). Gdy cząstki są tak małe jak włókna respirabilne azbestu lub mniejsze, nie opadają grawitacyjnie na powierzchnie i mogą w eksploatowanym budynku tygodniami lub miesiącami utrzymywać się w powietrzu ($k = 0$) wówczas wzór nr (3) przyjmie postać jak wzór nr (4):

$$C_t/C_0 = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Podstawiając stosowne wartości do $\lambda = (-1/t) \ln(C_t/C_0)$, otrzymamy wniosek wskazujący, że budynek, samoistnie oczyści się z pyłów w warunkach opisanych w trakcie prowadzenia badań (przy zamkniętych oknach) do poziomu tła, dopiero po ok. 75 dniach od momentu całkowitego zatrzymania prac. Stan ten zmieni się przy otworzeniu okien lub wprowadzeniu czyszczenia wnętrza. Z przeprowadzonej analizy porównawczej zmian wynika:

Tabela 2. Porównanie zmian wewnątrz pomieszczeń nieużytkowanych i użytkowanych. Źródło: opracowanie własne
Table 2. Comparison of changes in unoccupied and occupied rooms. Source: author's own study

Parametr analizy	(a) (Okna zamknięte lub brak okien/pomieszczenie nieużytkowane, szczelne)	(b-d) (Okna zamknięte / pomieszczenie użytkowane z wymianą powietrza) – rzeczywisty stan pomieszczeń mieszkalnych w budynku	Interpretacja
Maksymalne stężenie zewnętrzne C_{out}	1800 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 30)	1900 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	Podobny poziom zanieczyszczenia generowanego przez prace na zewnątrz.
Maksymalne stężenie wewnętrzne C_{in}	520 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 40) 420 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	800 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 40) 1500 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	Wzrost stężenia wewnątrz o 188% na Rysunku 2.
Wskaźnik penetracji I/O w pikach	0,25–0,29 (Średnio: 0,27)	0,79–0,89 (Średnio: 0,83)	(c-d) do wnętrza przenikało aż 83% pyłu (b) tylko 27%).
Efektywność (współczynnik tłumienia przegród A-I/O)	71%–75%	11%–21%	Zdolność budynku do zatrzymywania pyłu w pomieszczeniach (c-d) bliska zeru.
Zachowanie w fazie przerwy (Dni 40–80)	Powolny spadek wewnątrz.	Stężenie wewnątrz jest stale wyższe niż na zewnątrz.	Pomieszczenia budynku (c-d) działają jak pułapka, kumulując pył i uniemożliwiając jego uchodzenie zanieczyszczeń

- Materiał empirycznego ujawnia różnicę pomiędzy podejściem statystycznym (globalne linie trendu wykres (b) a podejściem deterministycznym (dynamiczne modele fizyczne, wykresy c, d).
- Do oceny generalnej nadaje się model statyczny (b).
- W aspekcie bezpieczeństwa zdrowotnego, w pracy wykazano wyższość modeli dynamicznych (c, d).
- W krótko terminowych cząstkowych pracach do oceny bezpieczeństwa personelu i mieszkańców należy stosować modele dynamiczne (oparte na równaniach różniczkowych) zamiast globalnych linii trendów, ponieważ te nie pomijają pików krótkoterminowych stężeń.

Zastosowanie przedstawionych krzywych zmienności stężenia wewnętrznego

W projekcie inżynierskim celowym może okazać się wykorzystanie trzech modeli. Pozwolą one na:

- diagnozę realnego zagrożenia na budowie w kluczowych etapach prac, na podstawie danych empirycznych i ustaleniach dynamicznego modelu trendu zmian (c), z uwzględnieniem zagrożeń w kluczowych etapach robót (d),
- zaprojektowanie automatycznej wentylacji dla przyszłych, analogicznych robót, model (c),
- określenie ogólnego trendu zmian jako skutku całego projektu (b).

Wnioski

- System powszechnie prowadzonych demontaży elewacji a-c z budynków mieszkalnych podczas obecności w nich mieszkańców naraża ich na podwyższone zanieczyszczenie powietrza włóknami azbestu.
- Przedłużający się remont potęguje problem przenikania azbestu do wnętrza budynku.
- Bezpośrednią przyczyną omawianego procesu jest podciśnienie wewnątrz budynku powodowane wentylacją grawitacyjną lub mechaniczną pomieszczeń użytkowanych.
- Aby zanieczyszczenie wewnątrz było jak najmniejsze podczas robót, pomieszczenia powinny być całkowicie wyłączone z użytkowania.
- Jednym z technicznych rozwiązań eliminującym przenikanie pyłów azbestu do wnętrza jest stworzenie nadciśnienia w wewnątrz obiektu i skuteczne odsysanie pyłów w miejscu ich powstania.

Bibliografia

- Bekierski, D., & Kostyrko, K. B. (2021). The influence of outdoor particulate matter PM2.5 on indoor air quality: the implementation of a new assessment method. *Energies*, 14(19), 6230. <https://doi.org/10.3390/en14196230>
- Brown, S. K. (1987). Asbestos exposure during renovation and demolition of Asbestos-Cement clad buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 48(5), 478–486. <https://doi.org/10.1080/15298668791385075>
- Chen, C., & Zhao, B. (2010). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and

- penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45(2), 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Craighead, J. E., Dibbs, A. R. ed. (2008). *Asbestos and its Diseases* OXFORD University press ISBN: 978-0195178692
- Dufresne, A., Dion, C., Frielaender, A., Audet, E., & Perrault, G. (2009). Personal and static sample measurements of asbestos fibres during two abatement projects. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(4), 440–443. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9661-4>
- Dumortier, P., & De Vuyst, P. (2011). Asbestos exposure during uncontrolled removal of sprayed-on asbestos. *The Annals of Occupational Hygiene*, 56(1), 49–54. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer096>
- Gualtieri, A. F., Mangano, D., Gualtieri, M. L., Ricchi, A., Foresti, E., Lesci, G., Roveri, N., Mariotti, M., & Pecchini, G. (2009). Ambient monitoring of asbestos in selected Italian living areas. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3540–3552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.007>
- ISO. (2007). ISO 16000-7:2007 Indoor air—Part 7: Sampling strategy for determination of airborne asbestos fibre concentrations. *International Organization for Standardization*.
- ISO. (2019). ISO 14966:2019 Ambient air—Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles—Scanning electron microscopy method. *International Organization for Standardization*.
- Kakooei, H., & Normohammadi, M. (2013). Asbestos Exposure among Construction Workers During Demolition of Old Houses in Tehran, Iran. *Industrial Health*, 52(1), 71–77. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0118>
- Lange, J. H., & Thomulka, K. W. (2000). Air sampling during asbestos abatement of floor tile and mastic. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(4), 497–501. <https://doi.org/10.1007/s001280000031>
- Lee, R., & Orden, V. (2007). Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(2), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
- Meier, R., Schindler, C., Eeftens, M., Aguilera, I., Ducret-Stich, R. E., Ineichen, A., Davey, M., Phuleria, H. C., Probst-Hensch, N., Tsai, M., & Künzli, N. (2015). Modeling indoor air pollution of outdoor origin in homes of SAPALDIA subjects in Switzerland. *Environment International*, 82, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.013>
- Nadali, A., Arfaeina, H., Asadgol, Z., & Fahiminia, M. (2020). Indoor and outdoor concentration of PM10, PM2.5 and PM1 in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1), 47–55. <https://doi.org/10.1080/02639594.2020.1728198>
- Obmiński, A. (2022). The natural reduction of threat in selected systems of old buildings containing asbestos. *Scientific Reports*, 12(1), 2580. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04487-y>
- Wallis, S. L., Hernandez, G., Poyner, D., Birchmore, R., & Berry, T. (2019). Particulate matter in residential buildings in New Zealand: Part I. Variability of particle transport into unoccupied spaces with mechanical ventilation. *Atmospheric Environment*, 210, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.aesoa.2019.100024>

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*.



Wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010-1 na wynikowe godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego

The impact of errors in the PN-EN ISO 52010-1 standard on the resulting hourly values of total solar irradiance



Dr inż. Piotr Michalak

ORCID ID: 0000-0002-8443-3502

Wydział Inżynierii Mechanicznej
i Robotyki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

pmichal@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: PN-EN ISO 52010-1, natężenie promieniowania słonecznego, promieniowanie dyfuzyjne, model Pereza

Streszczenie

Norma PN-EN ISO 52010-1 zawiera opis procedury do obliczania godzinowych wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na dowolnie zorientowaną powierzchnię pochyloną. W tym celu wykorzystuje ona model anizotropowy Pereza. Jednak w tej procedurze znajdują się błędy mające wpływ na wyniki obliczeń. Celem pracy jest ocena tych błędów w odniesieniu do oryginalnego modelu Pereza. Dla zobrazowania ich wielkości wykonano obliczenia dla powierzchni pochylonej do podłoża pod kątem 45° oraz 90°, skierowanej kolejno na północ, południe, wschód i zachód, zlokalizowanej w Krakowie. Wykorzystano dane z nowych Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 typu TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY. Do oceny jakości modelu z normy względem jego pierwotnej postaci wykorzystano cztery miary statystyczne, tj.: błąd średni (ME), błąd średni bezwzględny (MAE), błąd średniokwadratowy (MSE) oraz pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE). Dla powierzchni pionowej błąd średni we wszystkich przypadkach wskazywał na przeszacowanie przez model z normy obliczonego natężenia promieniowania słonecznego o średnią wartość od 1,2 W/m² do 1,9 W/m². Błąd RMSE był najniższy dla orientacji północnej, i wahał się od 6,5 W/m² (TMY) do 7,4 W/m² (ISO), zaś najwyższy dla orientacji południowej, w granicach od 7,8 W/m² (TMY) do 8,5 W/m² (HSY). Są to wartości, które wskazują na istotne rozbieżności, co może wpływać z kolei na obliczeniowe wskaźniki energetyczne budynków.

Keywords: PN-EN ISO 52010-1, solar irradiance, diffuse irradiance, Perez model

Abstract

The PN-EN ISO 52010-1 standard contains a description of the procedure for calculating the hourly total solar irradiance on any oriented inclined surface. For this purpose, it uses Perez's anisotropic model. However, there are errors in this procedure that affect the calculation results. The aim of this work is to evaluate these errors in relation to Perez's original model. To illustrate their magnitude, calculations were performed for surfaces inclined at angles of 45° and 90° to the ground, facing North, South, East and West, and located in Krakow. Data from the new Polish Typical Meteorological Years (TLM2000) in TMY, ISO, TRY, HSY and CWY formats were used. Four statistical measures were used to assess the quality of the standard model in relation to its original form, namely: mean error (ME), mean absolute error (MAE), mean square error (MSE) and root mean square error (RMSE). For vertical surfaces, the mean error in all cases indicated an overestimation by the standard model of the hourly values of the calculated solar irradiance by an average value of 1.2 W/m² to 1.9 W/m². The RMSE error was lowest for the north orientation, and varied from 6.5 W/m² (TMY) to 7.4 W/m² (ISO), and highest for the south orientation, from 7.8 W/m² (TMY) to 8.5 W/m² (HSY). These results indicate significant discrepancies, which in turn may affect the calculated energy performance of buildings.

Oznaczenia

- a – współczynnik modelu Pereza
- b – współczynnik modelu Pereza
- F₁ – współczynnik jasności – okołosłoneczny
- F₂ – współczynnik jasności – horyzontu
- f₁₁... f₂₃ – współczynniki modelu Pereza
- G_{sol;b} – normalne natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego
- G_{sol;b,h} – natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego padające na powierzchnię poziomą
- G_{s,d} – natężenie promieniowania rozproszonego na powierzchni poziomej
- I_{ext} – natężenie promieniowania słonecznego płasz-

- czyzny poziomej na górnej granicy atmosfery
- I_{dif} – całkowite natężenie promieniowania rozproszonego na powierzchni pochylonej
- I_{dir} – natężenie promieniowania bezpośredniego na powierzchni pochylonej
- I_{grnd} – natężenie promieniowania odbitego od gruntu
- I_{tot,norma} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej wyznaczone wg normy
- I_{tot,ref} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej wyznaczone wg modelu Pereza
- I_{tot} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej

T_{shift}	– różnica między czasem strefowym a UTC dla danej lokalizacji
m	– masa optyczna atmosfery
n_{day}	– numer kolejnego dnia w roku
t_s	– czas słoneczny rzeczywisty
t_{eq}	– równanie czasu
α_{sol}	– kąt wzniesienia słońca
β_{ic}	– kąt pochylenia powierzchni
δ	– deklinacja słoneczna
Δ	– współczynnik jasności nieboskłonu
ε	– współczynnik przejrzystości nieboskłonu
θ_z	– kąt zenitalny
$\theta_{\text{sol;ic}}$	– kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię pochyłą
λ_w	– długość geograficzna rozpatrywanej lokalizacji
$\rho_{\text{sol;grnd}}$	– współczynnik odbicia promieniowania słonecznego od gruntu
φ_w	– szerokość geograficzna rozpatrywanej lokalizacji
ω	– kąt godzinny Słońca
γ	– kąt azymutu rozpatrywanej powierzchni

Wstęp

Dążenie do ograniczenia energochłonności budynków przekłada się na rosnące wymagania dotyczące izolacyjności przegród zewnętrznych na przestrzeni ostatnich dekad (Lis & Lis, 2016). W związku z tym, w bilansie cieplnym istotny staje się udział energii promieniowania słonecznego (Idczak & Firląg, 2006; Świącicki, 2014). Może być ona także wykorzystana do przygotowania ciepłej wody oraz produkcji energii elektrycznej (Górzyński, 2020; Gil-Mastalerczyk & Kraska, 2023). Z tych powodów, ocena potencjału energetycznego promieniowania słonecznego w danej lokalizacji jest istotna z praktycznego punktu widzenia.

Latem 2017 roku Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) opublikował zestaw norm serii 52000 przeznaczonych do oceny charakterystyki energetycznej budynku. Jedną z nich jest norma EN ISO 52010-1, która we wrześniu tego samego roku została opublikowana przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) jako PN-EN ISO 52010-1:2017-09 (PKN, 2017). Zawiera ona m.in. opis procedury do obliczania natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na powierzchni o dowolnej orientacji i pochyleniu. Ta procedura opiera się na wykorzystaniu wartości godzinowych natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego padającego na powierzchnię poziomą, dostępnych w plikach typowych lat meteorologicznych. Na tej podstawie, dzięki zastosowaniu transpozycyjnego modelu Pereza (Perez et al., 1988), oblicza się godzinowe wartości natężenia promieniowania całkowitego na powierzchnię o danej orientacji (azymucie) i pochyleniu do poziomu. Procedura ta została przedstawiona w publikacji (Michalak, 2018). Zwrócono tam także uwagę na błędy w normie (niewłaściwe oznaczenia, czy też pomyłki we wzorach), mogące wpływać na rezultaty obliczeń. Ten problem rozwinęto w kolejnej pracy (Michalak, 2019a), gdzie na przykładzie pięciu lokalizacji zaprezentowano wyniki obliczeń natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię pionową zorientowaną w kierunkach N, S, E i W. Jako dane źródłowe wykorzystano pliki typowych lat meteorologicznych opracowane w oparciu o dane z lat 1971–2000, oznaczo-

ne jako TLM1970 (Narowski, 2006). Stwierdzone zostały różnice w wartościach miesięcznych napromieniowania uzyskanych wg normy oraz z zastosowaniem oryginalnego modelu Pereza. W kolejnym kroku wyznaczone zostały wartości rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania dwóch przykładowych budynków mieszkalnych (jedno i wielorodzinne), w tych samych lokalizacjach. W pierwszym obiekcie różnice jednostkowego wskaźnika zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania (EU) nie przekroczyły 0,3 kWh/m². Natomiast w drugim obiekcie te rozbieżności wahały się od –0,2 kWh/m² do +0,5 kWh/m². Zatem bez żadnych ingerencji w parametry budynku uzyskano różne wartości EU tylko z powodu błędów w zapisie procedury obliczeniowej podanej w normie. Co więcej, zgodnie z informacją zamieszczoną na stronie internetowej ISO (ISO, 2017), po pięciu latach obowiązywania, w roku 2022 norma została zweryfikowana i ponownie zatwierdzona bez żadnych poprawek. W związku z tym, jej wersja z roku 2017 nadal pozostaje aktualna.

Oprócz rodzaju zastosowanego modelu, obliczona wielkość napromieniowania, a zatem i słonecznych zysków ciepła oraz zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania zależą także od zastosowanych wejściowych danych meteorologicznych (Michalak, 2019b). Jest to o tyle istotne, że w roku 2022 zostały opublikowane nowe typowe lata meteorologiczne dla Polski (Narowski, 2022a; Narowski, 2022b), przygotowane przez dr inż. Piotra Narowskiego w ramach projektu TLM2000 w oparciu o dane meteorologiczne i klimatyczne z lat 2001–2020. W pracy (Narowski, 2022c) przedstawione zostało porównanie przebiegów zmienności temperatury termometru suchego oraz natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na powierzchnię poziomą z typowych lat meteorologicznych TLM1970 i TLM2000 dla sześciu lokalizacji. Wykazało ono różnice ich wartości godzinowych, co przełożyło się odpowiednio na wartości średnie miesięczne oraz sumy miesięczne.

W związku z tym zachodzi pytanie o wpływ błędów zidentyfikowanych w normie na rezultaty obliczeń wykonanych wg normy PN-EN ISO 52010-1:2017-09 w przypadku zastosowania nowych danych meteorologicznych z plików TLM2000.

W tym celu w niniejszym artykule przedstawiono procedurę oraz wyniki obliczeń godzinowego natężenia promieniowania całkowitego na powierzchnie pochyłone dla lokalizacji w Krakowie. Pozwoliły one na określenie różnic wynikających z zastosowania metody z normy oraz z oryginalnego modelu i sformułowanie wniosków.

Materiały i metody

Dane meteorologiczne

W obliczeniach posłużono się danymi meteorologicznymi ze zbioru TLM2000 dla Krakowa. Według informacji podanych w (Narowski, 2022c), pliki te zostały przygotowane zgodnie z pięcioma różnymi procedurami. Pierwsza została opracowana w National Renewable Energy Laboratory (NREL), a wynikowe pliki są dostępne, jako pliki TMY. Kolejna jest przedstawiona w normie PN-EN ISO 15927-4, zaś zbiory wynikowe oznaczono, jako pliki ISO. Trzecia została przedstawiona przez ASHRAE, a wygenerowane pliki oznaczono z kolei, jako TRY. Ponadto, opraco-

wane zostały lata meteorologiczne z najcieplejszym latem (HSY) oraz najchłodniejszą zimą (CWY). Tych pięć różnych zbiorów zawiera zestaw danych meteorologicznych dla każdego z 8760 godzinowych rekordów.

Algorytm obliczeń wg PN-EN ISO 52010-1

Norma określa różne ścieżki prowadzące do obliczenia godzinowych wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego (I_{tot}) padającego na rozpatrywaną powierzchnię. Ich wykorzystanie jest zależne od posiadanych danych promieniowania słonecznego.

We wszystkich rodzajach wymienionych wcześniej plików TLM znajdują się godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą: całkowitego ($G_{sol,g}$), bezpośredniego ($G_{sol;b,h}$), rozproszonego ($G_{sol,d}$) i na zewnętrznej warstwie atmosfery (I_{ext}), a także bezpośredniego normalnego ($G_{sol;b}$) oraz kąta wzniesienia słońca (α_{sol}). Fakt ten ułatwia dalsze obliczenia, które rozpoczyna się od wyznaczenia wartości parametrów pomocniczych. Pierwszym z nich jest masa optyczna atmosfery (m). Jeśli $\alpha_{sol} < 10$, wtedy:

$$m = 1/(\sin(\alpha_{sol}) + 0,15 \cdot (\alpha_{sol} + 3,885)^{-1,253}) \quad (1)$$

Jeśli $\alpha_{sol} \geq 10$ to:

$$m = 1/\sin(\alpha_{sol}) \quad (2)$$

W kolejnym kroku wylicza się kąt zenitalny (θ_z):

$$\theta_z = 90 - \alpha_{sol} \quad (3)$$

Lokalizacja danej powierzchni jest określona za pomocą znanej szerokości (φ_w) i długości (λ_w) geograficznej. Jej ułożenie dane jest poprzez kąt pochylenia do poziomu (β) oraz azymut (γ). Kąt azymutalny jest określany od południa, w kierunku wschodnim ze znakiem dodatnim, zaś w kierunku zachodnim – z ujemnym. Na tej podstawie określa się kąt padania promieni słonecznych na rozpatrywaną powierzchnię:

$$\begin{aligned} \theta_{sol;ic} = & \arccos [\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi_w) \cdot \cos(\beta) \\ & - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi_w) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi_w) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi_w) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega)] \end{aligned} \quad (4)$$

Kąt godzinowy Słońca (ω) oblicza się z zależności:

$$\omega = 15 \cdot (12,5 - t_s) \quad (5)$$

jako jego średnią pozycję w danej godzinie. Stąd też we wzorze występuje wartość 12,5 zamiast zwykle spotykanej 12.

Czas słoneczny rzeczywisty (t_s) w danej lokalizacji jest określony przez zależność:

$$t_s = n_{hour} - T_{shift} - t_{eq}/60 \quad (6)$$

Przy tym, n_{hour} oznacza kolejną godzinę doby czasu urzędowego. T_{shift} jest różnicą między czasem strefowym dla danej lokalizacji (określonej długością λ_w) a czasem uniwersalnym UTC:

$$T_{shift} = TZ - \lambda_w/15 \quad (7)$$

a TZ jest godzinowym przesunięciem czasu urzędowego w danej strefie w odniesieniu do UTC.

Równanie czasu (t_{eq}) jest w normie dane zależnością dla kolejnych dni (n_{day}) w roku:

$$\begin{aligned} t_{eq} = & -0,0113 - 0,0019 \cdot n_{day}, \text{ jeśli } n_{day} \leq 20, \\ t_{eq} = & -0,0227 - 0,0393 \cos(0,0357 \cdot (n_{day} - 43)), \\ & \text{jeśli } 20 < n_{day} \leq 135, \\ t_{eq} = & -0,0061 + 0,0218 \cos(0,0449 \cdot (n_{day} - 135)), \\ & \text{jeśli } 135 < n_{day} \leq 240, \\ t_{eq} = & 0,0275 + 0,0436 \cos(0,036 \cdot (n_{day} - 306)), \\ & \text{jeśli } 240 < n_{day} \leq 335, \\ t_{eq} = & -0,002 \cdot (n_{day} - 359), \text{ jeśli } n_{day} > 335 \end{aligned} \quad (8)$$

Deklinacja słoneczna określana jest z zależności:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,33281 - 22,984 \cdot \cos(R) - \\ & 0,3499 \cdot \cos(2 \cdot R) - 0,1398 \cdot \cos(3 \cdot R) + 3,7872 \cdot \sin(R) + \\ & 0,03205 \cdot \sin(2 \cdot R) + 0,07187 \cdot \sin(3 \cdot R) \end{aligned} \quad (9)$$

w której:

$$R = 360 \cdot n_{day}/365 \quad (10)$$

Znajomość powyższych parametrów pozwala na przejście do kolejnego etapu, w którym określone są parametry modelu Pereza. Są to współczynniki: modelu (a , b), przejrzystości nieboskłonu (ε) oraz jasności: nieboskłonu (Δ), okołosłoneczny (F_1) i horyzontu (F_2). Są one otrzymywane kolejno z zależności (11)–(16):

$$a = \max[0; \cos(\theta_{sol;ic})] \quad (11)$$

$$b = \max[\cos(85^\circ); \cos(\theta_z)] \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{sol;d} + G_{sol;b}}{G_{sol;d}} + 1,014 \left(\frac{\pi}{180} \alpha_{sol} \right)^3}{1 + 1,014 \left(\frac{\pi}{180} \alpha_{sol} \right)^3} \quad (13)$$

$$\Delta = m \cdot G_{sol;b}/I_{ext} \quad (14)$$

$$F_1 = \max[0; f_{11}(\varepsilon) + f_{12}(\varepsilon) \cdot \Delta + f_{13}(\varepsilon) \cdot (\pi \cdot \theta_z/180)] \quad (15)$$

$$F_2 = f_{21}(\varepsilon) + f_{22}(\varepsilon) \cdot \Delta + f_{23}(\varepsilon) \cdot (\pi \cdot \theta_z/180) \quad (16)$$

Wartości współczynników f_{11} oraz f_{12} we wzorach (15) i (16) są podane w (PKN, 2017), (Perez, 1988). Godzinowa wartość natężenia promieniowania rozproszonego padającego na powierzchnię pochyłą jest zaś obliczana z równania:

$$I_{dif} = G_{sol,d} \left[(1 - F_1) \frac{1 + \cos(\beta_{ic})}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin(\beta_{ic}) \right] \quad (17)$$

Szukana wartość natężenia promieniowania całkowitego jest sumą składowej bezpośredniej (I_{dir}), rozproszonej (I_{dif}) oraz odbitej od gruntu (I_{grnd}):

$$I_{tot} = I_{dir} + I_{dif} + I_{grnd} \quad (18)$$

Przy czym:

$$I_{dir} = \max[0; G_{sol;b} \cdot \cos(\theta_{sol;ic})] \quad (19)$$

Natężenie promieniowania odbitego od gruntu:

$$I_{grnd} = [G_{sol;d} + G_{sol;b} \cdot \sin(\alpha_{sol})] \cdot \rho_{sol;grnd} \cdot [1 - \cos(\beta_{ic})]/2 \quad (20)$$

Należy przy tym wspomnieć, że drugi (środkowy) składnik sumy po prawej stronie równania (17), a określający promieniowanie okołosłoneczne, w normie jest przypisany do składowej bezpośredniej i jest dodawany do składnika danego równaniem (19), a pomijany jest w równaniu (17). Matematycznie prowadzi to do tego samego rezultatu, jak równanie (18). Dlatego, dla czytelności i uproszczenia toku obliczeniowego, w niniejszej pracy nie zastosowano tej modyfikacji.

Uwagi do procedury z PN-EN ISO 52010-1

Jak już wspomniano we wstępie, w normie znajduje się kilka błędów o charakterze redakcyjnym i merytorycznym. O ile te pierwsze są możliwe do wychwycenia bez większych problemów, to błędy drugiego rodzaju można zidentyfikować jedynie analizując dokładnie kolejne formuły matematyczne i porównując je z tymi opublikowanymi w pracach źródłowych. W rozpatrywanym przypadku zidentyfikowano dwa błędy w równaniu (13), które prawidłowo powinno mieć postać:

$$\varepsilon = \frac{G_{sol;d} + G_{sol;b} + 1,041 \left(\frac{\pi}{180} \theta_z \right)^3}{1 + 1,041 \left(\frac{\pi}{180} \theta_z \right)^3} \quad (21)$$

Jak widać, zamiast " α_{sol} " jest tu " θ_z ", a zamiast współczynnika o wartości 1,014 jest 1,041.

Ocena rozbieżności

Przedstawienie wiarygodnej oceny wpływu zauważonych błędów na wyniki obliczeń wymaga nieco pogłębionej analizy. Najprostsze jest określenie maksymalnych i minimalnych różnic między badanymi modelami. Jednak nie daje to pełnego obrazu występujących rozbieżności. Badane zbiory danych obejmują bowiem wartości godzinowe dla pełnego roku, czyli dla 8760 rekordów dla każdego z rozpatrywanych przypadków. Dlatego w dalszej części do oceny rozbieżności pomiędzy modelem referencyjnym ($I_{sol,ref}$) a tym z normy ($I_{sol,norma}$) posłużono się także czterema miarami statystycznymi. Należą do nich kolejno (Pamuła, 2015):

Błąd średni (ME – Mean Error), dany zależnością:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref}) \quad (22)$$

Błąd średni bezwzględny (MAE – Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{tot,norma} - I_{tot,ref}| \quad (23)$$

Błąd średniokwadratowy (MSE – Mean Square Error):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref})^2 \quad (24)$$

Pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE – Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref})^2} \quad (25)$$

W rozpatrywanym przypadku liczba próbek $n = 8760$.

Wyniki

Dane meteorologiczne

Dla uzyskania odpowiedzi na wątpliwości przedstawione we wstępie zostały wykonane obliczenia wartości godzinowych natężenia promieniowania całkowitego. Zastosowano model z normy oraz model oryginalny, z prawidłową zależnością na współczynnik przejrzystości nieboskłonu (ε), zgodnie z równaniem (21). Obliczenia wykonano

z wykorzystaniem pięciu rodzajów plików z Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 wymienionych wcześniej, tj. TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY.

W Tabeli 1 zestawiono wartości maksymalne natężenia promieniowania słonecznego całkowitego ($G_{sol,g}$), bezpośredniego ($G_{sol;b,h}$) oraz rozproszonego ($G_{sol;d}$) na powierzchni poziomej w wymienionych zbiorach dla Krakowa.

Tabela 1. Wartości maksymalne irradancji (W/m^2) dla poszczególnych rodzajów plików TLM2000. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Maximum irradiance values (W/m^2) for individual types of TLM2000 files. Source: authors' own study

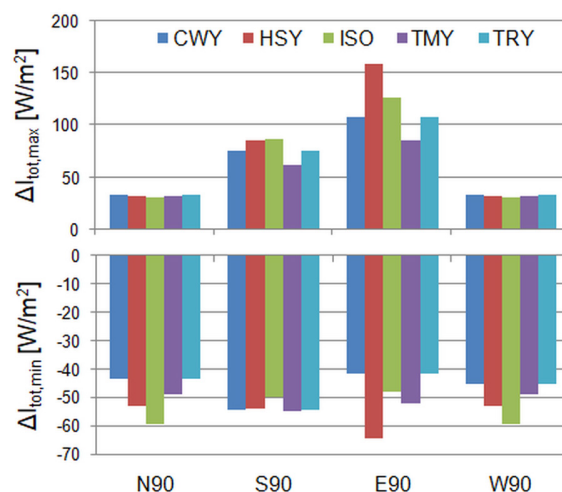
Parametr	TMY	TRY	ISO	HSY	CWY
$G_{sol,g}$	868,37	889,40	866,04	867,54	889,40
$G_{sol;b,h}$	707,51	744,66	720,68	724,71	744,66
$G_{sol;d}$	378,68	378,94	381,81	402,05	387,94

Mimo pozornie niewielkich rozbieżności między wartościami maksymalnymi należy mieć na uwadze, że różnice w metodologii wyboru danych źródłowych do poszczególnych rodzajów plików, przedstawione w (Narowski, 2022c), przekładają się na różnice ich przebiegów godzinowych w ciągu roku (Tabela 2). Ze względu na to, że pliki TMY są zalecane do stosowania w symulacjach energetycznych budynków, to różnice obliczono w odniesieniu do tego typu.

Tabela 2. Maksymalne i minimalne godzinowe różnice $G_{sol,g}$ (W/m^2) pomiędzy TMY oraz pozostałymi plikami. Źródło: opracowanie własne

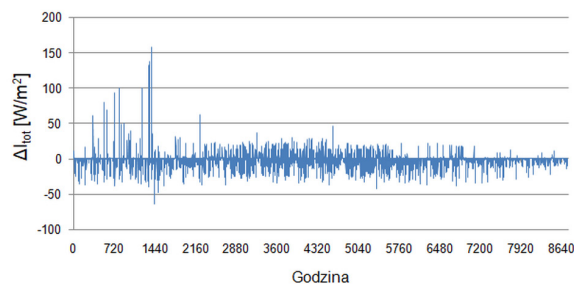
Table 2. Maximum and minimum hourly differences $G_{sol,g}$ (W/m^2) between TMY and other files. Source: authors' own study

	TMY - TRY	TMY - ISO	TMY - HSY	TMY - CWY
Max	644,03	653,03	751,44	848,61
Min	-770,73	-812,17	-293,09	-771,24



Rysunek 1. Maksymalne i minimalne godzinowe różnice ΔI_{tot} (W/m^2) pomiędzy wartościami referencyjnymi i obliczonymi z normy. Źródło: opracowanie własne

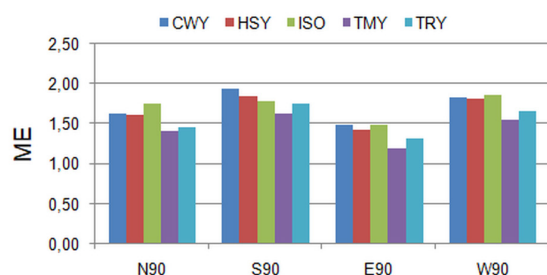
Figure 1. Maximum and minimum hourly differences of ΔI_{tot} (W/m^2) between reference values and the model from the standard. Source: authors' own study



Rysunek 2. Przebieg ΔI_{tot} dla pliku HSY i powierzchni E90.

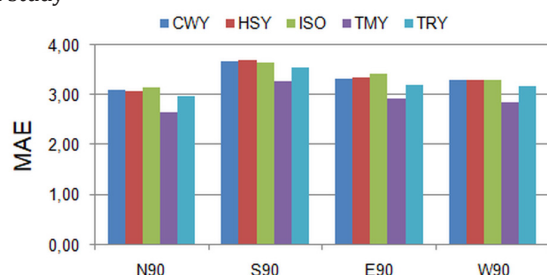
Źródło: opracowanie własne

Figure 2. ΔI_{tot} for a HSY file and an East-orientated vertical surface (E90). Source: authors' own study



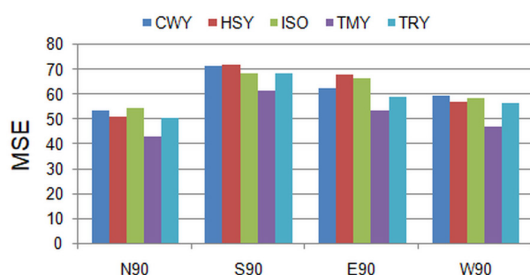
Rysunek 3. Błąd średni dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Average error for a vertical surface. Source: authors' own study



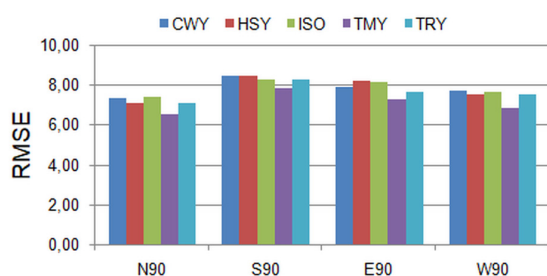
Rysunek 4. Błąd średni bezwzględny dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Mean average error for a vertical surface. Source: authors' own study



Rysunek 5. Błąd średniokwadratowy dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Meansquared error for a vertical surface. Source: authors' own study



Rysunek 6. Błąd RMSE dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. RMSE error for a vertical surface. Source: authors' own study

Rezultaty dla powierzchni pionowej wskazują, że wybór danego pliku do symulacji energetycznych budynków powinien być przemyślany, ponieważ może on istotnie wpłynąć na uzyskane rezultaty.

W dalszej części rozpatrzono powierzchnie zlokalizowane w Krakowie, pochylone do podłoża pod kątem 90° oraz 45° , a skierowane kolejno na północ (N), południe (S), wschód (E) i zachód (W). We wszystkich przypadkach pominięto składową odbitą od gruntu (refleksyjną) przyjmując współczynnik odbicia $\rho_{sol;grnd} = 0$.

Powierzchnia prostopadła do podłoża

Dla powierzchni prostopadłej do podłoża we wszystkich przypadkach zanotowano znaczne maksymalne rozbieżności względem modelu referencyjnego (Rysunek 1).

Wartości dodatnie ΔI_{tot} na Rysunku 2 oznaczają, że model z normy zaniża obliczone natężenie całkowite promieniowania słonecznego. Widać, że wartości maksymalne są najniższe (rzędu $31 \dots 33 \text{ W/m}^2$) dla orientacji północnej i zachodniej, zaś najwyższe dla orientacji wschodniej. Wartości minimalne są na podobnym poziomie ($-41 \dots -64 \text{ W/m}^2$) dla wszystkich typów plików TLM. Należy jednak mieć na uwadze, że w ciągu całego roku powyższe wartości mogą pojawić się incydentalnie. Dobrym tego przykładem jest np. wykres dla zbioru HSY dla powierzchni zorientowanej na wschód (E90), pokazany na Rysunku 2.

W związku z tym dokładniejszych informacji na temat zanotowanych rozbieżności dostarczyć może analiza statystyczna, której wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach. Wartość błędu średniego (Rysunek 3) była dodatnia we wszystkich przypadkach. Wskazuje to na systematyczne przeszacowywanie przez model z normy godzinowych wartości obliczonego natężenia promieniowania słonecznego o średnią wartość od $1,19 \text{ W/m}^2$ (TMY, E90) do $1,93 \text{ W/m}^2$ (CWY, S90). Jednak należy mieć na uwadze fakt, że podczas sumowania (równanie (22)) godzinowe wartości ujemne i dodatnie znoszą się wzajemnie. W związku z tym, dla uzyskania pełniejszego obrazu analizowanej sytuacji, konieczne jest wykorzystanie także innych miar.

Wartość błędu średniego bezwzględnego (Rysunek 4) wahała się od $2,67 \text{ W/m}^2$ (TMY, N90) do $3,71 \text{ W/m}^2$ (HSY, S90). Wskazuje ona średni błąd, jakim obarczone były wartości obliczone wg normy względem modelu odniesienia, dla całego roku.

Błąd średniokwadratowy MSE (Rysunek 5) wskazuje na rozrzut wokół średniej ze zbioru. Jednocześnie jest wrażliwy na wartości skrajne, oddalone od tej średniej. Jego wartości były najniższe dla orientacji północnej, najślabiej oświetlonej, a wahały się od $42,6$ (TMY) do $54,4$ (ISO). Najwyższe wartości zanotowano dla powierzchni zwróconej na południe i wyniosły one od $61,1$ (TMY) do $71,4$ (HSY).

Ostatni z wykorzystanych wskaźników to pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE (Rysunek 6), wyrażany w jednostkach analizowanej wielkości fizycznej. Można go interpretować jako średnią różnicę między wartościami z normy i odniesienia.

Jak widać z Rysunku 6, przyjmował on najniższe wartości dla orientacji północnej, od $6,5 \text{ W/m}^2$ (TMY) do $7,4 \text{ W/m}^2$ (ISO). Najwyższe zanotowano dla orientacji południowej, a wyniosły one od $7,8 \text{ W/m}^2$ (TMY) do $8,5 \text{ W/m}^2$ (HSY).

Powierzchnia pochyłona pod kątem 45°

Dla powierzchni pochyłonej pod kątem 45° do podłoża zanotowano różnice o podobnym charakterze jak w poprzednim przypadku, lecz o mniejszych wartościach. Wynika to z tego, że wraz ze zmniejszaniem kąta pochylenia rozpatrywanej powierzchni do poziomu, w całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego docierającego do tej powierzchni maleje udział składowej rozproszonej. Obliczone rozbieżności były jednak na tyle duże, że trudno je uznać za zanedbywalne.

Błąd średni (ME) wahał się dla orientacji wschodniej od 0,80 (TMY) do 1,02 (ISO) i dla południowej od 1,17 (TMY) do 1,40 (CWY). MAE z kolei przyjmował wartości od 2,05 W/m² (TMY) do 2,39 W/m² (ISO) i od 2,37 W/m² (TMY) do 2,69 W/m² (HSY) odpowiednio dla kierunku północnego i południowego.

Również MSE był niższy niż w poprzednim przypadku. Wahał się on od 24,7 (TMY) do 31,4 (ISO) dla południa oraz od 33,1 (TMY) do 39,0 (HSY) dla południa.

Z kolei RMSE przyjmował dość wyrównane wartości, od 4,97 W/m² (TMY) do 5,60 W/m² (ISO) i od 5,76 W/m² (TMY) do 6,24 W/m² (HSY), odpowiednio dla orientacji północnej i południowej.

Wnioski

W artykule przedyskutowano wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010 we wzorze na wartość współczynnika przejrzystości nieboskłonu w modelu Perez na wynikowe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego docierającego do powierzchni pochyłonej zlokalizowanej w Krakowie. Wykorzystano dane z plików Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 typu TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY. Niezależnie od rodzaju zbioru wejściowego zanotowano istotne rozbieżności rezultatów obliczeń wykonanych z wykorzystaniem oryginalnego, poprawnego, modelu oraz według normy. Ich wielkość, mierzona za pomocą pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE), w przypadku powierzchni prostopadłej do podłoża była najniższa dla orientacji północnej, i wyniosła od 6,5 W/m² (TMY) do 7,4 W/m² (ISO). Najwyższe rozbieżności zanotowano dla orientacji południowej, a wahały się one od 7,8 W/m² (TMY) do 8,5 W/m² (HSY).

Są to wartości, które nie można uznać za zanedbywalne. Jest to o tyle istotne, że mogą one mieć wpływ np. na rezultaty obliczeń charakterystyki energetycznej budynków. Dlatego też jak najszybciej powinny być one skorygowane przez odpowiedzialne za to instytucje.

Bibliografia

- Gil-Mastalerczyk, J., & Kraska, K. (2023) Promieniowanie słoneczne – istotny element w procesie projektowania domu pasywnego w Polsce. *Materiały Budowlane*. 2023(7), 11–17. <https://doi.org/10.15199/33.2023.07.03>
- Górzyński, J. (2020) Pozyskiwanie i przetwarzanie energii odnawialnej. *Napędy i sterowanie*. 22(10), 70–77

- Idczak M., & Firląg Sz. (2006). Okna u budynkach pasywnych – funkcje, wymagania, bilans energetyczny, komfort cieplny. *Świat szkła*. 2022(7–8), 38–45
- ISO. (2017) ISO 52010-1:2017 Energy performance of buildings — External climatic conditions. Part 1: Conversion of climatic data for energy calculations.
- Lis P., & Lis A. (2016). Możliwość poprawy efektywności energetycznej budynków edukacyjnych. *Budownictwo o Z optymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 1(17), 55–60. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2016.1.08>
- Michalak, P. (2018). Obliczanie natężenia promieniowania słonecznego całkowitego padającego na dowolnie zorientowane powierzchnie pochyłone według nowej normy PN-EN ISO 52010-1:2017. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (7), 280–287. <https://doi.org/10.15199/9.2018.7.5>
- Michalak, P. (2019). Wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010-1 na wyniki obliczeń natężenia promieniowania słonecznego. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 50(7), 253–256. <https://doi.org/10.15199/9.2019.7.2>
- Michalak, P. (2019). Nowe normy serii PN-EN ISO 52000 a miesięczne zyski ciepła od nasłonecznienia w budynkach mieszkalnych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 50(2), 50–55. <https://doi.org/10.15199/9.2019.2.2>
- Narowski, P. (2006). Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 11(37), 22–27
- Narowski, P. (2022). Nowe typowe lata meteorologiczne dla Polski. *Rynek Instalacyjny*. 2022(11), 32–36
- Narowski, P. (2022). TLM2000 – Typowe lata meteorologiczne dla Polski wyznaczone na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych z lat 2001–2020. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 53(9), 7–20. <https://doi.org/10.15199/9.2022.9.1>
- Narowski, P. (2022). Analiza porównawcza typowych lat meteorologicznych Polski wyznaczonych na podstawie danych źródłowych z lat 2001–2020. *Instal*, 2022(10), 11–25. <https://doi.org/10.36119/15.2022.10.2>
- Pamuła, T. (2015). Predykcja natężenia ruchu w ciągu skrzyżowań z wykorzystaniem sieci neuronowych. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 22(12), 1180–1185.
- Perez, R., Stewart, R., Seals, R., & Guertin, T. (1988). The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model. *Atmospheric Sciences Research Center SUNY at Albany*. <https://www.osti.gov/biblio/7024029>
- Święcicki, A. (2014). Optymalizacja wymiany okien z uwzględnieniem efektu solarnego. *Materiały Budowlane*. 2014(12), 55–57. <https://doi.org/10.15199/33.2014.12.18>
- PKN. (2017) PN-EN ISO 52010-1:2019-09. Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Zewnętrzne warunki klimatyczne – Część 1: Konwersja danych klimatycznych do obliczeń energetycznych. *Polski Komitet Normalizacyjny*, 2017, Warszawa

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*.



Metoda doboru pomp ciepła do modułowych budynków dworców kolejowych w różnych strefach klimatycznych Polski

Method for selecting heat pumps for modular railway station buildings in different climatic zones of Poland



Dr inż. Edward Bramson

ORCID ID: 0000-0001-9765-5123

Sieć Badawcza Łukasiewicz

- Instytut Elektrotechniki

edward.bramson@iel.lukasiewicz.gov.pl



Dr inż. Renata Sulima

ORCID ID: 0000-0002-5085-2274

Sieć Badawcza Łukasiewicz

- Instytut Elektrotechniki

renata.sulima@iel.lukasiewicz.gov.pl

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii (OZE), dobór pomp ciepła, budynki modułowe, dworce kolejowe, strefy klimatyczne, SCOP, zapotrzebowanie na ciepło

Streszczenie

W artykule przedstawiono autorską metodę doboru pomp ciepła przeznaczonych do ogrzewania w modułowych budynkach dworców kolejowych. Metoda uwzględnia zróżnicowanie stref klimatycznych Polski, charakterystykę energetyczną modułowych obiektów dworcowych oraz rzeczywiste parametry eksploatacyjne pomp ciepła. Opracowany algorytm, zaimplementowany w środowisku Python, wykorzystuje bazę danych urządzeń grzewczych i umożliwia półautomatyczny dobór źródła ciepła dostosowanego do lokalnych warunków klimatycznych i zapotrzebowania obiektu na ciepło. Zaprezentowane wyniki potwierdzają użyteczność metody w procesie projektowania instalacji grzewczych w obiektach użyteczności publicznej, głównie w modułowych dworcach PKP.

Keywords: renewable energy sources (RES), heat pump selection, modular buildings, railway stations, climatic zones, SCOP, heat demand

Abstract

The article presents an original method for selecting heat pumps intended for heating in modular railway station buildings. The method takes into account the diversity of Poland's climate zones, the energy characteristics of modular station facilities, and the actual operating parameters of heat pumps. The developed algorithm, implemented in the Python environment, uses a database of heating devices and enables semi-automatic selection of a heat source adapted to local climatic conditions and the building's energy demand. The presented results confirm the usefulness of the method in the design process of heating systems for public utility buildings, particularly modular PKP railway stations.

Wstęp

Rosnąca presja na dekarbonizację sektora budownictwa oraz zwiększenie efektywności energetycznej obiektów użyteczności publicznej powoduje dynamiczny wzrost zainteresowania pompami ciepła, głównie typu powietrze-woda, jako podstawowym źródłem ciepła (Carter & De Kock, 2019). Urządzenia te, dzięki wykorzystaniu ciepła powietrza zewnętrznego, pozwalają na znaczną redukcję emisji CO₂ oraz ograniczenie kosztów eksploatacyjnych w porównaniu z tradycyjnymi systemami opartymi na paliwach kopalnych. W budynkach użyteczności publicznej, charakteryzujących się długim okresem użytkowania oraz koniecznością spełniania coraz bardziej restrykcyjnych wymagań energetycznych i środowiskowych, pompy ciepła stają się jednym z kluczowych elementów nowoczesnych systemów grzewczych.

Szczególną grupę obiektów stanowią modułowe budynki dworców kolejowych eksploatowanych przez PKP. Obiekty te wyróżniają się krótkimi i często nieregularnymi czasami użytkowania, wynikającymi z rozkładów jazdy. W praktyce oznacza to znaczne wahania zapotrzebowania na ciepło i ciepłą wodę użytkową w ciągu doby oraz se-

zonu grzewczego. System grzewczy takich obiektów musi zatem charakteryzować się wysoką elastycznością pracy oraz pewnymi aspektami autonomiczności, gdyż budynki te są najczęściej bezobsługowe. Na Rysunku 1 przedstawiono przykładową instalację grzewczą proponowaną do zastosowania w modułowym budynku dworca PKP.

Parametry modułowych budynków dworcowych i porównanie z dworcem tradycyjnym

W ramach projektu Rail4EARTH Horizon Europe (JU-2022-FA4-01) opracowano koncepcję modułowych budynków dworcowych oraz przeprowadzono analizę porównawczą ich parametrów technicznych, energetycznych i środowiskowych względem tradycyjnych budynków dworcowych. Wyniki tych analiz zostały przedstawione w raporcie (Politechnika Poznańska, 2024) i stanowią podstawę zaprezentowanego porównania.

Modułowe budynki dworców kolejowych projektowane są jako obiekty o powtarzalnej konstrukcji, składające się z prefabrykowanych modułów o określonych funkcjach (m.in. poczekalnia, zaplecze techniczne, toalety). Przy-

kładowy obiekt odniesienia składa się z sześciu modułów, w tym modułów obsługowych, technicznych oraz opcjonalnej wieży dla instalacji. Konstrukcja ta umożliwia prefabrykację w warunkach fabrycznych i szybki montaż na miejscu (Politechnika Poznańska, 2024). Istotną cechą tych obiektów jest wysoki standard energetyczny przegród, zbliżony do budownictwa pasywnego, co przekłada się na ograniczenie strat ciepła. Dodatkowo uwzględniono rozwiązania takie jak zacienianie, wentylacja nocna oraz możliwość integracji odnawialnych źródeł energii (np. instalacji fotowoltaicznych). Wybrane wyniki analizy porównawczej przeprowadzonej w ramach projektu Rail4EARTH (Politechnika Poznańska, 2024) zestawiono w Tabeli 1.

Z przedstawionych danych wynika, że zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku modułowego było ponad dwukrotnie niższe niż w przypadku obiektu tradycyjnego, co wynikało z lepszych parametrów izolacyjnych przegród oraz optymalizacji konstrukcji. Podobna tendencja występowała w przypadku chłodzenia, gdzie zapotrzebowanie na energię było niższe o około 65%.

Analiza wykazała również znaczącą redukcję emisji CO₂ na etapie produkcji materiałów i budowy (A1–A3), wynoszącą około 78%. Był to efekt zarówno mniejszego zapotrzebowania na energię, jak i zastosowania materiałów o niższym śladzie węglowym. Dodatkowo technologia modułowa umożliwiła skrócenie czasu realizacji inwestycji o ponad 50%, co ma generalnie istotne znaczenie ekonomiczne i organizacyjne.

Przeprowadzone w ramach projektu Rail4EARTH (Politechnika Poznańska, 2024) analizy wskazują, że modułowe budynki dworcowe charakteryzują się wyraźnie lepszą efektywnością energetyczną oraz niższym oddziaływaniem środowiskowym niż ich tradycyjne odpowiedniki. Osiągnięte wyniki potwierdzają zasadność stosowania



Rysunek 1. Przykład instalacji grzewczej opartej na pompie ciepła typu powietrze-woda zainstalowanej w hipotetycznym modułowym budynku dworca PKP. Źródło: opracowanie własne powstałe ze wsparciem AI

Figure 1. Analyses Example of a heating system based on an air-to-water heat pump installed in a hypothetical modular PKP railway station building. Source: Author's own work developed with AI support.

technologii modułowej jako rozwiązania odpowiadającego współczesnym wymaganiom zrównoważonego budownictwa oraz efektywności eksploatacyjnej.

Uwarunkowania doboru pomp ciepła

Profil zapotrzebowania na energię modułowych budynków dworcowych

Zapotrzebowanie na energię analizowanych obiektów było silnie zmienne w czasie i zależało od warunków klimatycznych oraz sposobu użytkowania obiektu. Dominującym składnikiem tego zapotrzebowania było ogrzewanie, natomiast zużycie ciepłej wody miało charakter nieregularny. Ze względu na zmienność obciążenia klasyczne metody doboru pomp ciepła, oparte na pojedynczych wartościach obliczeniowych, mogą prowadzić do błędów projektowych. Uzasadnia to zastosowanie podejścia algorytmicznego, co potwierdzają również współczesne badania nad optymalizacją pracy systemów grzewczych (Girón i in., 2025; Carter & De Kock, 2019).

Klimatyczne uwarunkowania doboru pomp ciepła

Warunki klimatyczne mają istotny wpływ na efektywność pomp ciepła, szczególnie typu powietrze-woda. Spadek temperatury zewnętrznej powoduje obniżenie współczynnika COP, a zatem wzrost zużycia energii elektrycznej (Nyers & Nyers, 2011). Z powodu zróżnicowania klimatycznego terenu Polski konieczne jest uwzględnienie wartości temperatury obliczeniowej oraz ich wpływu na sezonową efektywność (SCOP). Jednolite podejście projektowe w warunkach różnych lokalizacji może prowadzić do błędnego doboru urządzeń.

Strefy klimatyczne Polski

Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego, jednak ze względu na uwarunkowania geograficzne i lokalne różnice klimatyczne, na

Tabela 1. Analizy przeprowadzone w ramach raportu wskazują na istotne różnice pomiędzy budynkiem modułowym a tradycyjnym dworcem kolejowym (Politechnika Poznańska, 2024)

Table 1. Analyses conducted as part of the report indicate significant differences between a modular building and a traditional railway station (Politechnika Poznańska, 2024)

Parametr	Budynek tradycyjny (Biskupice Wlkp.)	Budynek modułowy
Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania	47,8 kWh/(m ² ·rok)	22,8 kWh/(m ² ·rok)
Zapotrzebowanie na energię do chłodzenia	35,0 kWh/(m ² ·rok)	12,3 kWh/(m ² ·rok)
Redukcja zapotrzebowania energii na ogrzewanie	–	ok. 52% niższe
Emisja CO ₂ (etap A1–A3)	994 kg CO ₂ e/m ²	220 kg CO ₂ e/m ²
Czas realizacji	ok. 17 tygodni	ok. 8 tygodni



Rysunek 2. Strefy klimatyczne Polski (Centrum Energii Odnawialnej)

Figure 2. Climatic zones of Poland (Centrum Energii Odnawialnej)

potrzeby projektowania wyróżniono kilka stref klimatycznych o zróżnicowanych wartościach temperatury obliczeniowej (Rysunek 2 i Tabela 2).

Wpływ temperatury zewnętrznej na efektywność pomp ciepła

Temperatura zewnętrzna istotnie wpływa na efektywność pomp ciepła, szczególnie typu powietrze-woda. Jej spadek powoduje obniżenie współczynnika COP, a zatem wzrost zużycia energii elektrycznej. Kluczowym parametrem eksploatacyjnym pozostaje sezonowy współczynnik efektywności SCOP, którego metodologia wyznaczania określona jest w normie PN-EN 14825 (PKN, 2022). W cieplejszych strefach klimatycznych osiąga on wyższe wartości, natomiast w chłodniejszych ulega obniżeniu, zwłaszcza przy eksploatacji w warunkach niskiej temperatury otoczenia.

Uwzględnienie wartości temperatury obliczeniowej oraz jej wpływu na sezonową efektywność pomp ciepła jest konieczne z punktu widzenia poprawności projektu (Piechurski & Szulgowska-Zgrzywa, 2016). Właściwości te uwzględniane są w procedurach obliczeniowych norm PN-EN 14825 (PKN, 2022) oraz EN 15316-4-2 (ESC, 2017). Współczynniki efektywności energetycznej pomp ciepła (COP i SCOP) przyjęto na podstawie danych katalogowych producentów pomp, przy czym metodologia wyznaczania wartości COP i SCOP została znormalizowana w normie PN-EN 14511 (PKN, 2023) oraz PN-EN 14825 (PKN, 2022). Przyjęte w analizie wartości temperatur obliczeniowych oraz odpowiadające im korekty sezonowego współczynnika efektywności SCOP zestawiono w Tabeli 3.

Założenia do procesu doboru pomp ciepła

Proces doboru pomp ciepła oparto na następujących założeniach:

Tabela 2. Przybliżone długości sezonu grzewczego źródło: opracowanie własne na podstawie temperatur obliczeniowych dla stref klimatycznych wg PN-EN 12831-1:2017-08 (PKN, 2017) oraz (Zubek, 2025)

Table 2. Approximate duration of the heating season Source: Author's own elaboration based on the design outdoor temperatures for climatic zones specified in PN-EN 12831-1:2017-08 (PKN, 2017) and (Zubek, 2025)

Strefa klimatyczna	Temperatura obliczeniowa [°C]	Długość sezonu grzewczego [dni/rok]	Charakterystyka
I	-16	180–200	Krótszy sezon grzewczy, łagodne zimy, korzystne warunki do stosowania pomp ciepła
II	-18	200–210	Umiarkowany klimat, sporadyczne okresy niskiej temperatury
III	-20	210–220	Warunki referencyjne, zrównoważony czas ogrzewania
IV	-22	220–240	Wydłużony sezon grzewczy, częstsze okresy niskiej temperatury
V	-24	240–260	Najdłuższy sezon grzewczy, wymagające warunki eksploatacyjne

Tabela 3. Wartości temperatury oraz korekta SCOP w zależności od strefy klimatycznej polski. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Temperature values and SCOP corrections depending on the climatic zone of Poland. Source: authors' own study

Strefa klimatyczna	Temperatura obliczeniowa T_e [°C]	Charakter warunków pracy	Korekta SCOP
I	-16	Łagodny klimat, dominująca praca przy temperaturach dodatnich i przejściowych	+5%
II	-18	Dobre warunki sezonowe, sporadyczna praca w warunkach niskiej temperatury	+2%
III	-20	Warunki referencyjne – brak korekty	0%
IV	-22	Pogorszenie warunków pracy w okresach zimowych	-5%
V	-24	Surowy klimat, częsta praca w warunkach temperatury granicznej	-10%

- znana geometria i charakterystyka energetyczna budynku modułowego (typowo 6 modułów o funkcjach użytkowych i technicznych),
- znana strefa klimatyczna oraz temperatura obliczeniowa,
- wykorzystanie bazy danych rzeczywistych pomp ciepła,
- dobór urządzeń na podstawie kryteriów: pokrycie zapotrzebowania na moc cieplną, zapewnienie pracy przy temperaturze minimalnej T_{min} (do -24°C w strefie V), maksymalizacja efektywności sezonowej (SCOP), zapewnienie stabilnej pracy systemu.

W analizowanych budynkach modułowych przyjęto parametry wynikające z raportu (Politechnika Poznańska, 2024):

- standard przegród zbliżony do budownictwa pasywnego (niskie współczynniki U),
- zapotrzebowanie na energię do ogrzewania: ok. $22,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$,
- uproszczony współczynnik wentylacyjnych strat ciepła: $0,34 \cdot V \cdot \Delta T$,
- temperatura wewnętrzna: 20°C ,
- eksploatacja przy zmiennym obciążeniu cieplnym.

W celu weryfikacji metody opracowano aplikację obliczeniową umożliwiającą integrację obliczeń strat ciepła z procesem doboru pomp ciepła na podstawie rzeczywistych danych katalogowych. Aplikacja pozwala na: wyznaczenie zapotrzebowania na moc cieplną budynku, analizę wpływu strefy klimatycznej, dobór urządzeń spełniających przyjęte kryteria energetyczne i eksploatacyjne.

Struktura danych wejściowych

W aplikacji wykorzystano dwa główne źródła danych: dane geometryczne i eksploatacyjne budynku oraz bazę danych pomp ciepła.

Dane geometryczne i eksploatacyjne budynku mogą być wprowadzone w dwóch trybach:

1. Baza przykładowa – zawierająca predefiniowane zestawy danych dla modułowych budynków dworcowych (typy A, B1, B2), powtarzalna konstrukcja modułowa (typowe moduły o wymiarach ok. $2,4 \times 4,7 \times 4,2 \text{ m}$), podział na strefy funkcjonalne (poczekalnia, zaplecze techniczne, sanitariaty), wysoka izolacyjność przegród, niewielka kubatura i intensywna wymiana powietrza.
2. Dane własne użytkownika – umożliwiające wprowadzenie parametrów geometrycznych bezpośrednio z dokumentacji technicznej.

Właściwości cieplne przegród budowlanych analizowanego obiektu wprowadzone do aplikacji przedstawiono w Tabeli 4.

Baza danych pomp ciepła została opracowana przez autorów na podstawie kart katalogowych pomp ciepła dostępnych na rynku. Baza zawiera zestawienie parametrów technicznych oraz danych ekonomicznych istotnych z punktu widzenia procesu doboru.

Baza danych, wczytywana z pliku Excel, obejmuje: nazwy modeli i producentów pomp ciepła, moce grzewcze w różnych punktach pracy (np. A-7/W35), współczynniki

efektywności energetycznej (COP, SCOP), ceny urządzeń, wybrane dane katalogowe.

Zastosowanie rzeczywistych danych rynkowych umożliwia przeprowadzenie analizy nie tylko pod kątem technicznym, ale również ekonomicznym.

Model obliczeniowy zapotrzebowania na moc

Zapotrzebowanie na moc cieplną obiektu obliczane jest jako suma strat przez przenikanie oraz wentylację (Równanie 1).

$$\Phi = \Phi_T + \Phi_V \quad (1)$$

gdzie:

Φ_T – straty przez przenikanie, W,

Φ_V – straty wentylacyjne, W.

Straty przez przenikanie obliczane są według zależności (2).

$$\Phi_T = \sum (U_i \cdot A_i \cdot \Delta T) \quad (2)$$

gdzie:

U_i – współczynnik przenikania ciepła, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,

A_i – powierzchnia przegrody, m^2 ,

ΔT – różnica wartości temperatury wewnętrznej i zewnętrznej, K.

W aplikacji uwzględniono: podłogi, dach, ściany zewnętrzne, powierzchnie dylatacyjne pomiędzy strefami.

Straty wentylacyjne określono wykorzystując uproszczoną zależność (3).

$$\Phi_V = 0,34 \cdot n \cdot V \cdot \Delta T \quad (3)$$

gdzie:

n – krotność wymian powietrza [$1/\text{h}$]

V – kubatura pomieszczeń, m^3 .

Model obliczeniowy pozwala na podział budynku na kilka stref temperaturowych, co jest szczególnie istotne w przypadku analizowanych obiektów modułowych.

Uwzględnienie stref klimatycznych

W aplikacji umożliwiono wybór strefy klimatycznej, dla której automatycznie przypisywana jest temperatura obliczeniowa. Ponadto zaimplementowano współczynniki korekcyjne SCOP, uwzględniające wpływ warunków klimatycznych na efektywność pracy pomp ciepła. Skorygowany współczynnik efektywności wyznaczany jest zgodnie z zależnością (4).

$$SCOP_{koryg} = SCOP_{katalog} (1 + k_{strefy}) \quad (4)$$

gdzie:

k_{strefy} – współczynnik korekcyjny zależny od strefy klimatycznej.

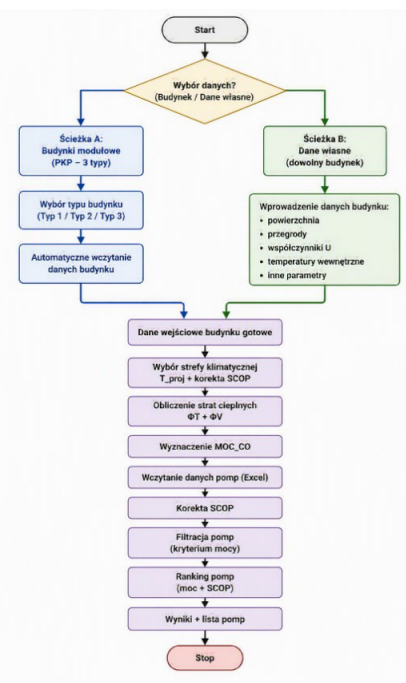
Interfejs użytkownika

Interfejs graficzny aplikacji umożliwia: wybór budynku i strefy klimatycznej, wprowadzanie danych własnych, edycję współczynników przenikania ciepła, wybór konkretnego modelu pompy ciepła, analizę wyników obliczeń, co przedstawiono na Rysunku 3. Po wprowadzeniu danych wejściowych i uruchomieniu obliczeń aplikacja wyznacza zapotrzebowanie budynku na moc cieplną oraz

Tabela 4. Izolacyjność przegród w budynku modułowym dworca PKP (Politechnika Poznańska, 2024)

Table 4. Thermal insulation of partitions in a modular PKP railway station building (Politechnika Poznańska, 2024)

Przegroda	Współczynnik U , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Charakterystyka
Ściany zewnętrzne	0,10–0,15	Wysoka izolacyjność, przegrody warstwowe prefabrykowane
Dach	0,08–0,12	Najlepiej izolowana przegroda
Podłoga na gruncie	0,12–0,18	Zależne od sposobu posadowienia
Okna i drzwi	0,80–1,10	Stolarka o podwyższonej izolacyjności
Połączenia modułów	~ 0,15–0,20 (efektywne)	Uwzględnienie mostków cieplnych



oblicza skorygowaną wartość współczynnika SCOP z uwzględnieniem wybranej strefy klimatycznej. Przykładowe okno z wynikami obliczeń przedstawiono na Rysunku 4. Następnie program przeszukuje bazę danych pomp ciepła i generuje listę urządzeń spełniających przyjęte kryteria doboru, uporządkowaną według zadanych parametrów, co zilustrowano na Rysunku 5.

Rozwiązanie to stanowi praktyczne narzędzie wspierające projektowanie instalacji grzewczych powtarzalnych obiektów modułowych, w szczególności w kontekście infrastruktury kolejowej. Zastosowanie algorytmicznego podejścia umożliwia bardziej precyzyjne dopasowanie urządzeń do rzeczywistych warunków pracy, co znajduje potwierdzenie w badaniach nad optymalizacją parametrów pomp ciepła (Girón Cruz i in., 2025; Kimura & Fujimoto, 2025).

Wnioski

Dostępne narzędzia internetowe do doboru pomp ciepła, oferowane głównie przez producentów, mają zazwyczaj charakter uproszczony i ograniczony do własnej oferty urządzeń. Nie uwzględniają one w pełni zmienności obciążenia cieplnego, lokalnych uwarunkowań klimatycznych ani aspektów ekonomicznych, a także nie umożliwiają porównania urządzeń różnych producentów oraz przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej.

Jednocześnie zastosowanie modułowych budynków dworcowych pozwala na istotne ograniczenie zapotrzebowania na ciepło, głównie dzięki wysokiej izolacyjności przegród oraz zoptymalizowanej konstrukcji. W analizowanym przypadku zapotrzebowanie na energię do ogrzewania jest ponad dwukrotnie niższe niż w budynku tradycyjnym. Zmienny charakter użytkowania tych obiektów powoduje jednak znaczne wahania obciążenia cieplnego, co stawia wysokie wymagania w stosunku do systemów grzewczych oraz procesu ich doboru.

Rysunek 3. Okno dialogowe aplikacji PKPomp oraz blokowy schemat działania aplikacji. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. PKPomp application dialog window and application operation flowchart. Source: authors' own study

Rysunek 4. Wynik obliczeń aplikacji dla wybranego budynku. Źródło: opracowanie własne
Figure 4. Application calculation results for the selected building. Source: authors' own study

Dobór pomp – 26 modeli w zakresie 90–130% (wszystkie firmy)

Dopasowanie mocy		Najwyższy SCOP W35					
Producent	Model	Moc @ A-7W35 [kW]	Dopasowanie [%]	COP @ A-7W35	SCOP W35 (kat.)	SCOP W35 (skoryg.)	
Bosch	Bosch	2.42	99.2	2.42	4.25	4.46	
Bosch	Bosch	2.42	99.2	2.42	4.25	4.46	
Bosch	Bosch	2.42	99.2	2.42	4.25	4.46	
Bosch	Bosch	2.42	99.2	2.42	4.25	4.46	
Siemens	AirMaster 100	2.47	101.2	2.47	4.02	4.22	
Siemens	AirMaster 150	2.47	101.2	2.47	4.02	4.22	
Atlantic	Atlantic Extensa	2.59	106.1	2.59	4.46	4.68	
Bosch	Bosch	2.63	107.8	2.63	4.77	5.01	
Bosch	Bosch	2.63	107.8	2.63	4.77	5.01	
Bosch	Bosch	2.63	107.8	2.63	4.77	5.01	
Bosch	Bosch	2.63	107.8	2.63	4.77	5.01	
Atlantic	Atlantic Extensa	2.63	107.8	2.63	4.46	4.68	
Siemens	AirMaster 100	2.68	109.8	2.68	3.88	4.07	
Siemens	AirMaster 150	2.68	109.8	2.68	3.88	4.07	
Siemens	AirMaster 100	2.72	111.5	2.72	3.92	4.12	
Siemens	AirMaster 150	2.72	111.5	2.72	3.92	4.12	

Rysunek 5. Wynik działania programu w postaci listy pomp ciepła odpowiednich w przypadku danego budynku. Źródło: opracowanie własne
Figure 5. Program output in the form of a list of heat pumps suitable for the given building. Source: authors' own study

Istotnym czynnikiem wpływającym na pracę pomp ciepła są warunki klimatyczne. W chłodniejszych strefach klimatycznych obserwuje się spadek sezonowej efektywności urządzeń oraz wzrost zapotrzebowania na moc szczytową, co zwiększa ryzyko błędów projektowych przy stosowaniu uproszczonych metod doboru. Wpływ temperatury zewnętrznej na wartości współczynników COP i SCOP znajduje potwierdzenie w literaturze przedmiotu (Piechurski & Szulgowska-Zgrzywa, 2016; Ashton i in., 2025; Nyers, & Nyers, 2011).

W konsekwencji tradycyjne podejścia projektowe mogą prowadzić do przewymiarowania lub niedowymiarowania mocy źródła ciepła, skutkującego obniżeniem efektywności energetycznej oraz wzrostem kosztów eksploatacyjnych. Zastosowanie podejścia algorytmicznego umożliwia natomiast dokładniejsze dopasowanie urządzeń do rzeczywistych warunków pracy, z uwzględnieniem zarówno charakterystyki budynku, jak i uwarunkowań klimatycznych.

Opracowana aplikacja wpisuje się w aktualne kierunki badań dotyczące optymalizacji systemów HVAC, w których wykorzystywane są metody obliczeniowe i modele predykcyjne zmierzające do poprawy energetycznej oraz ekonomicznej efektywności systemów (Carter & De Kock, 2019; Kimura & Fujimoto, 2025; Girón Cruz i in., 2025). Dodatkową zaletą aplikacji jest wykorzystanie autorskiej bazy danych zawierającej rzeczywiste parametry techniczne i ceny urządzeń, co umożliwia rozszerzenie procesu doboru o analizę ekonomiczną i zwiększa jego praktyczną użyteczność.

Opracowane narzędzie PKPomp umożliwia półautomatyczny, powtarzalny i obiektywny dobór pomp ciepła, ograniczając ryzyko błędów projektowych oraz wspierając podejmowanie decyzji inwestycyjnych. Zaprezentowana metoda stanowi rozwinięcie istniejących podejść projektowych i może być z powodzeniem stosowana również w innych obiektach użyteczności publicznej o zmiennym profilu obciążenia cieplnego.

Podziękowania

Projekt współfinansowany ze środków polskiego Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach programu pn. Projekty Międzynarodowe Współfinansowane pt. *Zrównoważone i ekologiczne systemy kolejowe (akronim: FP – Rail4EARTH) realizowanego w ramach międzynarodowego programu HORYZONT EUROPA na podstawie umowy zawartej z organizacją międzynarodową lub podmiotem zagranicznym o nr 101101917.*

Bibliografia

- Ashton, R. W., Roberti, D., & Michael, S. (2025). Factors Influencing Heat Pump COP and SCOP with Defrost Cycles: An Economic Perspective. In *2025 International Conference on Sustainable Technology and Engineering (i-COSTE)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/i-COSTE68047.2025.11467546>
- Carter, T. E., & De Kock, J. A. (2019). Optimization of a residential heat pump system. In *2019 International Conference on*

the Domestic Use of Energy (DUE) (pp. 1-6). IEEE.

- Centrum Energii Odnawialnej. Kiedy pompa ciepła się opłaca? <https://ceo-odnawialna.pl/aktualnosci1/kiedy-pompa-ciepła-sie-opłaca> (Dostęp z 29.07.2026)
- ESC. (2017). EN 15316-4-2:2017-06 Charakterystyka energetyczna budynków — Metoda obliczania zapotrzebowania na ciepło przez instalację i sprawności układu — Część 4-2: Źródła ciepła w pomieszczeniach, instalacje z pompami ciepła, moduły M3-8-2 i M8-8-2. *European Committee for Standardization*
- Girón Cruz, P. J., Rodriguez Santiago, J., Härtel, P., & Dobschinski, J. (2025). Combining Learning-Based Cop Proxies and Formal Optimization for Residential Heat Pump System Operation. In *International Conference on the European Energy Market 2025*. <https://doi.org/10.1109/EEM64765.2025.11050098>
- Kimura, R., & Fujimoto, Y. (2025). Optimization of the Coefficient of Performance in Heat Pump Systems and its Application to Climate Intervention. In *2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICM62621.2025.10934943>
- Nyers, J. M., & Nyers, Á. J. (2011). COP of heating-cooling system with heat pump. In *2011 IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)* (pp. 17-21). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741809>
- Piechurski, K., & Szulgowska-Zgrzywa, M. (2016). Wpływ warunków klimatycznych i obciążenia cieplnego budynku na efektywność energetyczną pomp ciepła powietrze/woda z płynną regulacją mocy. *Rynek Instalacyjny*, (10), 21–26.
- PKN. (2017). PN-EN 12831-1:2017-08 Charakterystyka energetyczna budynków — Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego — Część 1: Obciążenie cieplne, Moduł M3-3. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN. (2022). PN-EN 14825:2022-11 Klimatyzatory, agregaty do chłodzenia cieczy oraz pompy ciepła ze sprężarkami napędzanymi elektrycznie, do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń — Badanie i ocena w warunkach częściowego obciążenia oraz obliczanie wydajności sezonowej. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN. (2023). PN-EN 14511-3:2023-02 Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym — Część 3: Metody badań. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- Politechnika Poznańska. (2024). *Opracowanie modeli BIM na poziomie LOD2 elementów stacji modułowej* (Raport D11.6). Raport wewnętrzny projektu FP4–Rail4EARTH, HORIZON-ER-JU-2022-FA4-01, umowa grantowa nr 101101917.
- Zubek, A. (2025). Sezon grzewczy w Polsce – kiedy się zaczyna, kończy i ile trwa? Silesion.pl. <https://silesion.pl/sezon-grzewczy-w-polsce-kiedy-sie-zaczyna-konczy-i-ile-trwa> (Dostęp z 29.07.2026)

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.*



Ochrona i bezpieczeństwo dostaw ciepła w dobie transformacji energetycznej. Jakie rozwiązania są stosowane w systemie ciepłowniczym miasta Rzeszowa?

Protection and security of heat supply in the era of energy transformation. What solutions are used in the Rzeszow heating system?



Mgr inż. Wojciech Orzech

Zastępca Kierownika Działu
Eksploatacji i Dyspozycji Sieci
Ciepłowniczej BOK
Dyspozytor Sieci Ciepłowniczej
MPEC Rzeszów Sp. z o.o.
w.orzech@mpecrzeszow.pl



Jacek Mazur

Specjalista na ds. obrony cywilnej
MPEC Rzeszów Sp. z o.o.
j.mazur@mpecrzeszow.pl



Dr hab. inż. Bożena Babiarz, prof. PRZ

ORCID ID: [0000-0001-7153-5975](https://orcid.org/0000-0001-7153-5975)
Wydział Budownictwa, Inżynierii
Środowiska i Architektury
Politechnika Rzeszowska
bbabiarz@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: transformacja energetyczna, eksploatacja systemu ciepłowniczego, niezawodność, bezpieczeństwo dostaw ciepła, ochrona infrastruktury sieci ciepłowniczej

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia ryzyk operacyjnych i ochrony infrastruktury w procesie eksploatacji sieci ciepłowniczej, ze szczególnym uwzględnieniem niezawodności dostaw ciepła dla miasta Rzeszowa. Metodyka opiera się na studium przypadku rzeszowskiego systemu ciepłowniczego. Przeanalizowano dane z narzędzi modelowania hydraulicznego, łączących bazy GIS z oprogramowaniem Audytor SCW, a także oceniono wdrożone procedury ochrony fizycznej obiektów pod kątem obrony cywilnej i zarządzania kryzysowego. Najważniejsze wyniki potwierdzają, że wymiana izolacji na magistralnych sieciach napowietrznych obniża straty ciepła na przesył o około 47%. Modelowanie wykazało ponadto, że średni czas dopływu czynnika grzewczego do odbiorców końcowych wynosi do 7 godzin. Główne wnioski wskazują, że bezwładność termodynamiczna i hydrauliczna systemu wymaga ewolucyjnego tempa zmian technologicznych podczas transformacji energetycznej. Utrzymanie bezpieczeństwa dostaw ciepła opiera się na całodobowym nadzorze dyspozytorskim i systemie telemetrii, a kluczem do bezpiecznej przyszłości systemu jest integracja ciepłownictwa z elektroenergetyką (Sector Coupling) przy zapewnieniu odpowiedniego bufora czasowego na inwestycje.

Keywords: renewable energy sources (RES), heat pump selection, modular buildings, railway stations, climatic zones, SCOP, heat demand

Abstract

The article presents the issues of operational risks and infrastructure protection in the operation of a district heating network, with particular emphasis on the reliability of heat supply for the city of Rzeszow. The methodology is based on a case study of the Rzeszow district heating system. Data from hydraulic modeling tools combining GIS databases with Audytor SCW software were analyzed, and implemented physical protection procedures for facilities were assessed for civil defense and crisis management purposes. Key findings confirm that replacing insulation on overhead mains reduces heat losses during transmission by approximately 47%. The modeling also showed that the average delivery time of the heating medium to end users is up to 7 hours. The main conclusions indicate that the thermodynamic and hydraulic inertia of the system requires an evolutionary pace of technological change during the energy transition. Maintaining the security of heat supply relies on 24/7 dispatch supervision and a telemetry system, and the key to a secure future for the system is the integration of district heating with the power sector (Sector Coupling), while ensuring an adequate time buffer for investments.

Wstęp

W obecnym czasie przyspieszającej transformacji energetycznej, polskie systemy ciepłownicze stają przed zasadniczym pytaniem o definicję niezawodności i bezpieczeństwa dostaw ciepła. Tradycyjny model sieci ciepłowniczych, który był projektowany w okresie źródeł

węglowych oraz stałych parametrów sieciowych, musi dziś sprostać wymaganiom przepisów unijnych oraz polskich aktów prawnych narzucających sukcesywne i kompleksowe przejście ku systemom nie tylko efektywnym energetycznie i niskoemisyjnym, lecz także optymalnych kosztowo zarówno dla przedsiębiorstw ciepłowniczych jak i odbiorców końcowych.

Wyzwanie to nie jest jedynie kwestią zmiany miksu paliwowego, opartego na głębokiej dekarbonizacji, integracji sektora ciepłowniczego z elektroenergetyką (tzw. Sector Coupling), lecz przede wszystkim próbą utrzymania ciągłości eksploatacyjnej w warunkach zwiększonej dynamiki hydraulicznej i cyfrowej złożoności (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). W artykule wskazano, w jaki sposób profesjonalna eksploatacja i dyspozycja sieciowa, ochrona infrastruktury sieciowej oraz nowoczesne narzędzia analityczne stają się nie tyle wsparciem, co fundamentem gwarantującym niezawodność i bezpieczeństwo dostaw ciepła, czyniąc z nadchodzących wyzwań transformacyjnych szansę na budowę odpornego na przyszłe kryzysy systemu ciepłowniczego.

Rozpatrywanym przypadkiem w postaci case study będzie miejski system ciepłowniczy miasta Rzeszowa, zarządzany przez Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej – Rzeszów Spółkę z ograniczoną odpowiedzialnością (MPEC-Rzeszów). Artykuł ma na celu przybliżenie w aspekcie praktycznym ryzyk operacyjnych w procesie transformacji, z którymi mierzy się kadra MPEC-Rzeszów oraz zagadnienia obejmujące ochronę infrastruktury sieci ciepłowniczej realizowaną pod kątem obrony cywilnej, sytuacji geopolitycznej, a także niezawodności eksploatacyjnej dostaw ciepła do odbiorców końcowych oraz bezpieczeństwa energetycznego miasta Rzeszowa.

Fizyka nie znosi pośpiechu. Dlaczego ciepłownictwo potrzebuje własnego tempa?

Z chwilą włączenia polskiej gospodarki w struktury Unii Europejskiej oraz system handlu emisjami ETS, a więc blisko od ponad dwóch dekad, dysponowano odpowiednim czasem na przygotowanie infrastruktury ciepłowniczej i elektroenergetycznej do zmian. Środki pozyskiwane z handlu uprawnieniami do emisji nie zasiłały w pełni sektora do spokojnego procesu modernizacyjnego zarówno źródeł wytwórczych oraz sieci ciepłowniczych i elektroenergetycznych. W efekcie, dzisiejsze obserwowane przyspieszenie transformacji energetycznej nosi znamiona chaotycznego nadrabiania zaległości. Na rynku obserwuje się silną presję technologiczną oraz legislacyjną – różne środowiska promują konkretne technologie i urządzenia, różne metodyki zmian legislacyjnych. Zatwierdzenie przebiegu transformacji energetycznej z Komisją Europejską nie zostało pomyślnie sfinalizowane, wiele ważnych strategicznych dokumentów dla polskiego sektora elektroenergetycznego i ciepłowniczego nie zostało w pełni ukończonych i zatwierdzonych (URE, 2026). Autorzy, jako inżynierowie eksploatacji nie polemizują z samą koniecznością dekarbonizacji. Potwierdzany jest fakt, iż transformacja energetyczna musi nastąpić. Zasadniczy problem tkwi jednak w narzuconym tempie zmian i kierunku, w którym zmierza. Kluczowym aspektem, który może współgrać ze sobą jest integracja sektora ciepłowniczego z elektroenergetyką (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021).

Próby przebudowy infrastruktury ciepłej miast w przestrzeni najbliższych kilku lat pomijają w swoim aspekcie podstawowe prawa fizyki. System ciepłowniczy to „organizm” o potężnej bezwładności cieplnej i hydraulicz-

nej. Zmiana parametrów pracy, integracja rozproszonych źródeł wytwórczych czy obniżanie krzywych grzewczych wymagają odpowiedniego czasu i precyzyjnego zestrojenia. Systemy ciepłownicze jako systemy rozproszone, nie funkcjonują w środowisku zbliżonym do środowiska pracy systemu elektroenergetycznego – choć i ten boryka się dziś z potężnymi barierami przesyłowymi – gdzie medium można przekierować w ułamku sekundy. W ciepłownictwie mamy do czynienia z setkami ton nośnika ciepła w ciągłym ruchu, oporami sieci i zjawiskami termodynamicznymi, które w swoim działaniu nie tolerują gwałtownych, wymuszonych legislacyjnie rewolucji.

Należy jednak podkreślić różnicę w skali i architekturze. Każdy miejski system ciepłowniczy to unikalny, lokalny „organizm” współpracy źródeł wytwórczych i sieci ciepłowniczej. Można rzec, iż zwyczajowo jest „uszyty na miarę” potrzeb konkretnej aglomeracji, zdeterminowany poprzez ukształtowanie terenu, gęstością, wysokością i wiekiem zabudowy oraz historycznym modelem rozwoju infrastruktury, co doskonale widać na przykładzie rzeszowskiego systemu ciepłowniczego. Sieci ciepłowniczej nie można traktować szablonowo, schematycznie i wdrażać w niej z dnia na dzień rozwiązania kopiowane z ogólnokrajowego systemu elektroenergetycznego.

Docelowo, system ciepłowniczy może, a wręcz powinien, stać się elastycznym elementem większego, zintegrowanego systemu elektroenergetycznego – chociażby pełniąc funkcję wielkiego, buforowego magazynu energii ciepłej dla stabilizacji pracy sieci elektroenergetycznych (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). Aby jednak ta integracja nie zakończyła się technicznym paraliżem, systemom ciepłowniczym należy zapewnić odpowiedni margines czasu i przestrzeni technologicznej. Należy uwzględnić ich naturalną bezwładność i lokalną specyfikę. Próba forsowania szybkich zmian bez zastosowania tego bufora czasowego uderzy bezpośrednio w to, co z perspektywy dyspozycji sieciowej jest wartością nadrzędną – w niezawodność oraz bezpieczeństwo dostaw ciepła do tysięcy odbiorców końcowych (Babiarz i in., 2024; Babiarz & Szymański, 2021).

Cyberbezpieczeństwo, integracja ciepłownictwa z elektroenergetyką i rola operatorów systemów ciepłowniczych w aspekcie bezpieczeństwa dostaw ciepła

Ewolucja systemów ciepłowniczych w stronę sieci inteligentnych (Smart Grids) sprawia, że tradycyjna bariera między sferą informatyczną (w skr. IT) a technologią operacyjną (w skr. OT) niemal całkowicie zanika (Osmólski, 2026). Szczególnym wyzwaniem pozostają starsze urządzenia przemysłowe, które projektowano przed dekadami bez wbudowanych mechanizmów szyfrowania czy uwierzytelniania, co w dobie powszechnej łączności czyni je podatnymi na manipulację parametrami pracy, takimi jak przepływy mocy czy sygnały sterujące, co może prowadzić do destabilizacji dostaw ciepła. Wprowadzenie dyrektywy NIS2 oraz jej implementacja poprzez nowelizację ustawy o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa (w skr. KSC) stanowi fundament nowej architektury ochrony infrastruktury krytycznej, w tym sektora ciepłowniczego

(Ustawa o KSC, Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2026a). Regulacje te znacząco rozszerzają krąg podmiotów objętych obowiązkami – obecnie operatorzy wytwarzający ciepło na podstawie koncesji są traktowani jako podmioty kluczowe lub ważne, co nakłada na nich rygorystyczne wymogi w zakresie zarządzania ryzykiem i ciągłości działania. Kluczową zmianą prawną jest przeniesienie bezpośredniej odpowiedzialności za stan cyberbezpieczeństwa na kadre kierowniczą wyższego szczebla, co wymusza odejście od traktowania ochrony cyfrowej jako problemu wyłącznie technicznego. Skuteczna obrona nowoczesnego systemu ciepłowniczego wymaga podejścia wielowarstwowego, opartego na uwzględnianiu zabezpieczeń już na etapie projektowania. Z perspektywy operacyjnej fundamentem pozostaje integracja funkcji monitoringu, stałe podnoszenie kompetencji cyfrowych kadry inżynierskiej oraz zapewnienie możliwości bezpiecznego przejścia na sterowanie ręczne w sytuacjach kryzysowych.

Współczesne bezpieczeństwo systemów ciepłowniczych opiera się na odejściu od dominacji jednego źródła energii na rzecz budowy inteligentnego, zdywersyfikowanego miksu technologicznego. Integracja różnych nośników ciepła, takich jak biomasa, biogaz, energia ze spalania odpadów czy odnawialne źródła energii (w skr. OZE), staje się warunkiem przetrwania sektora i jego odporności na zmienność rynkową oraz geopolityczną. Fundamentem odporności przyszłych systemów jest koncepcja *Sector Coupling*, czyli głęboka integracja ciepłownictwa z sektorem elektroenergetycznym, gazowniczym oraz gospodarką odpadami. Kluczową rolę odgrywają tu technologie *Power-to-Heat* (w skr. P2H), takie jak wielkoskalowe pompy ciepła i kotły elektrodowe, które pozwalają na transformację nadwyżek energii elektrycznej z OZE w ciepło użytkowe. Dzięki temu systemy ciepłownicze mogą pełnić funkcję gigantycznego bufora dla KSE, gromadząc nadmiar mocy w okresach wysokiej generacji wiatrowej lub słonecznej, co stabilizuje sieć i ogranicza konieczność kosztownego ograniczania pracy źródeł zielonej energii. Ważnym filarem odporności są również systemy hybrydowe oraz zaawansowane magazyny ciepła, które pozwalają na czasowe oddzielenie produkcji energii od jej zużycia. Nowoczesne elektrociepłownie ewoluują w stronę wielofunkcyjnych hubów energetycznych, łączących elastyczną kogenerację gazową z magazynami dobowymi i sezonowymi oraz instalacjami OZE. Akumulacja energii w postaci ciepła jest procesem znacznie tańszym, niż technologie bateryjne, co pozwala na gromadzenie energii w okresach niskich cen i jej oddawanie w szczytach zapotrzebowania, gwarantując niezawodność dostaw nawet w trudnych warunkach pogodowych (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). Pełna integracja tych rozwiązań, wsparta cyfrowym monitoringiem, tworzy nowoczesną strukturę ciepłowniczą, która jest w stanie zapewnić ciągłość usług przy minimalnym śladzie węglowym.

Bezpieczeństwo współczesnych systemów ciepłowniczych, mimo postępującej automatyzacji, wciąż w decydującym stopniu zależy od czynnika ludzkiego (Osmólski, 2026). Człowiek pełni w tym układzie wiele różnych ról – od projektanta systemu, przez wykonawcę, aż po eksploatatora odpowiedzialnego za codzienne zarządzanie. W dobie transformacji cyfrowej rola kadry inżynierskiej ulega jednak fundamentalnej zmianie: pracownicy prze-

stają być wyłącznie operatorami urządzeń, stając się analitykami nadzorującymi systemy poprzez decyzje w czasie rzeczywistym. Automatyzacja nie eliminuje człowieka z systemu, lecz wspiera go, pozwalając dyspozytorom skupić się na analizie i przewidywaniu zagrożeń zamiast na prostych reakcjach operacyjnych. Sektor ciepłowniczy mierzy się obecnie z głęboką luką pokoleniową i kompetencyjną, co wymusza restrukturyzację zatrudnienia oraz zmianę profilu potrzeb kadrowych. Fundamentem stabilności przedsiębiorstwa staje się umiejętne połączenie doświadczenia starszych pracowników z nowym spojrzeniem młodych pracowników rozpoczynających swoją ścieżkę kariery. Warunkiem bezpiecznego przejścia przez proces transformacji jest wdrożenie systemowych programów kształcenia i szkoleń z zakresu zarządzania projektami, nowoczesnych technologii oraz analityki danych. Budowanie świadomości zagrożeń musi obejmować wszystkie szczeble organizacji – od kadry zarządzającej odpowiedzialnej za strategię, po pracowników terenowych mających bezpośredni kontakt z infrastrukturą. Rola edukacyjna przedsiębiorstw ciepłowniczych wykracza również poza ramy wewnętrzne, obejmując edukację oraz doradztwo dla odbiorców końcowych. Współczesne spółki ciepłownicze pełnią funkcję doradcy energetycznego, ucząc mieszkańców racjonalnego zużycia ciepła, korzyści z termomodernizacji oraz wyjaśniając zawiłości dekarbonizacji. Takie podejście pozwala na budowanie zaufania społecznego, które jest niezbędnym elementem akceptacji dla kosztownych inwestycji infrastrukturalnych.

Ochrona infrastruktury sieci ciepłowniczej realizowana przez MPEC-Rzeszów Sp. z o.o. – studium przypadku

Trwająca od kilku lat wojna w Ukrainie oraz incydenty związane atakami dywersyjnymi na infrastrukturę kolejową w Polsce w ubiegłym roku pokazują, że należy dokonać analizy bezpieczeństwa infrastruktury komunalnej zapewniającej bezpieczeństwo mieszkańców miast. Niewątpliwie do takiej infrastruktury należy zaliczyć obiekty i sieci przesyłowe systemu ciepłowniczego. Obowiązujące akty prawne takie jak Ustawa o zarządzaniu kryzysowym z dnia 27 kwietnia 2007 roku określa obiekty i systemy infrastruktury krytycznej (w skr. IK), które muszą podlegać obowiązkowej ochronie (Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2026c). O tym czy obiekt lub system zalicza się do IK decydują szczegółowe kryteria zapisane w niejawnym załączniku do Narodowego Programu Ochrony Infrastruktury Krytycznej.

W tym aspekcie prawnym obiekty i systemy ciepłownicze nie są zaliczane do infrastruktury krytycznej, jednak Ustawa o ochronie osób i mienia z dnia 22 sierpnia 1997 r. w rozdziale 2 ust. 3 opisuje obiekty i urządzenia szczególnie ważne dla funkcjonowania aglomeracji miejskich, które powinny podlegać obowiązkowej ochronie (Ustawa o ochronie osób i mienia, tj. Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 1997). W rozdziale ustawodawca określa rodzaj ochraniających obiektów m.in. elektrownie i ciepłownie. Jednak powyższy zapis nie stanowi o ochronie innych również ważnych obiektów i elementów infrastruktury ciepłowniczej takich jak np. naziemne sieci ciepłownicze, komory napowietrzne lub obiekty przepompowni, któ-

rych zniszczenie może spowodować długotrwałą przerwę w dostawach ciepła systemowego do odbiorców.

Na mocy ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej z dnia 5 grudnia 2024 r. MPEC-Rzeszów został zarządzeniem prezydenta miasta Rzeszowa wyznaczony jako podmiot ochrony ludności z głównym zadaniem zapewnienia ciągłości dostaw ciepła i ciepłej wody dla mieszkańców miasta w czasie kryzysu, stanu klęski żywiołowej, stanu wojennego i czasie wojny (Ustawa o ochronie ludności i obronie cywilnej, tj. Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2024a). Wypełniając zapisy przedmiotowego zarządzenia dokonano oceny stanu bezpieczeństwa obiektów, infrastruktury ciepłowniczej oraz systemu sterowania pracą sieci.

MPEC-Rzeszów Sp. z o.o. od ponad 60 lat dostarcza ciepło systemowe dla mieszkańców miasta, zaczynając od systemu opartego na węglu i gazie do niskoemisyjnych źródeł wyspowych i pełnej digitalizacji. W latach 2015–2024 dokonano modernizacji i rozbudowy 114 km sieci i przyłączy, zainstalowano 766 nowoczesnych węzłów ciepłych (MPEC, 2026).

Prowadząc nowe inwestycje nie zapomniano o bezpieczeństwie w zakresie dostaw ciepła. Obejmują one działania modernizacji sieci polegające na wymianie starych i nieefektywnych rur kanałowych na nowoczesne odcinki sieci z rur preizolowanych. Proces przesyłu ciepła jest monitorowany przez system telemetrii, zdalnego odczytu liczników i monitoringu sieci. Zabezpieczenia systemu monitorowania i sterowania pracą sieci ciepłowniczej są pierwszym krokiem w celu zapewnienia bezpieczeństwa dostaw ciepła systemowego. Kolejnym ważnym elementem to ochrona i dozór fizyczny obejmujący obiekty administracyjne, magazyn główny i obiekt pogotowia ciepłowniczego.

W zakresie ochrony fizycznej kluczowych obiektów MPEC-Rzeszów korzysta z usług specjalistycznej firmy ochrony zapewniającej ochronę fizyczną obiektu magazynu głównego oraz utrzymanie w sprawności eksploatacyjnej systemu sygnalizacji włamania i systemu kamer przemysłowych telewizji dozorowej.

Ochrona i dozór obiektów MPEC-Rzeszów oparty jest o całodobowy dyżur dyspozytorów pogotowia ciepłowniczego. Dyspozytor pogotowia jest pierwszym ogniwem, który podejmuje decyzje w zakresie oceny sytuacji kryzysowej i powiadamiania osób funkcyjnych. Monitoring wizyjny wszystkich kluczowych obiektów jest dostępny dla dyspozytora pogotowia ciepłowniczego, ponadto posiada on informację o działaniu systemu włamania do budynków.

Przeprowadzona analiza zagrożeń dla systemu ciepłowniczego miasta Rzeszowa wskazuje na niewielkie prawdopodobieństwo przeprowadzenia uszkodzenia sieci w wyniku ataków dywersyjnych, niemniej jednak występują wrażliwe elementy sieci, których uszkodzenia spowodowałyby braki w dostawie ciepła systemu dla mieszkańców miasta. Są to szczególnie elementy sieci napowietrznej prowadzące od źródeł ciepła – elektrociepłowni, dlatego podejmuje się starania prowadzenia ochrony wizyjnej newralgicznych odcinków. Ponadto wykorzystywane są mobilne patrole pracowników Wydziałów Eksploatacji, polegające na kontroli stanu sieci, sprawdzeniu komór napowietrznych oraz przepompowni.

Stan infrastruktury ciepłowniczej miasta to nie tylko nowoczesne rozwiązania i transformacja sieci ciepłowniczej, ale również ochrona obiektów i urządzeń przed nie-

uprawnioną ingerencją. W tym zakresie MPEC-Rzeszów realizuje proces bezpieczeństwa rozwijając nowe projekty mające na celu zabezpieczenie infrastruktury ciepłowniczej i zapewnienie ciągłości dostaw ciepła systemowego dla mieszkańców miasta.

Praktyczne zarządzanie niezawodnością i bezpieczeństwem w realnej eksploatacji sieci ciepłowniczej na przykładzie Miejskiego Systemu Ciepłowniczego w Rzeszowie – studium przypadku

Miejski System Ciepłowniczy w Rzeszowie liczy ponad 256 km sieci ciepłowniczych, w tym prawie 80% stanowią sieci wykonane w technologii rur preizolowanych. Sieci napowietrzne (tradycyjne) stanowią około 8%, zaś sieci kanałowe około 10% (MPEC, 2026).

Sieci napowietrzne stanowią jeden z ważnych elementów systemu ciepłowniczego, ponieważ ich lokalizacje obejmują funkcję transportu nośnika ciepła wytworzonego przez dwa niezależne źródła ciepła, zlokalizowane po dwóch przeciwnych stronach miasta Rzeszowa (MPEC, 2026). Ze źródeł ciepła wyprowadzone są napowietrzne sieci magistralne (Rysunek 1), których zadaniem jest rozprowadzenie ciepła na terenie miasta, przy wykorzystaniu geometrii pierścieniowo – promieniowej z kilkunastoma dużymi pierścieniami (MPEC, 2026). Długotrwała eksploatacja sieci napowietrznych wiąże się z ryzykiem wystąpienia zwiększonych strat ciepła na przesyle z uwagi na stan techniczny izolacji termicznej rurociągów, eksploatowanych od ponad 50 lat. Mając świadomość występowania strat ciepła oraz związanych z nimi kosztów, MPEC-Rzeszów starając się zapewnić niezawodność i bezpieczeństwo dostaw ciepła podejmuje się szeregu działań w celu ich ograniczenia.

Rozpoczęto wymianę izolacji na sieciach napowietrznych magistralnych wychodzących od źródeł ciepła (Rysunek 2). Wytypowana została w pierwszej kolejności sieć magistralna wychodząca ze źródła ciepła zlokalizowanego w północno-wschodniej części Rzeszowa, której łączna długość wynosi ponad 1800 m. Założony do realizacji plan



Rysunek 1. Wymiana izolacji na rurociągu zasilającym - stan przed wymianą (MPEC, 2026)

Figure 1. Replacing the insulation on the supply pipeline - condition after replacing (MPEC, 2026)

termomodernizacji infrastruktury ciepłowniczej wymaga wysokich nakładów finansowych. Rozłożony w perspektywie kilku lat proces pozwoli na poprawę niezawodności i bezpieczeństwa dostaw ciepła do odbiorców końcowych, którego wynikiem będzie minimalizacja strat ciepła na przesyle. MPEC-Rzeszów w drodze postępowania przetargowego zlecił prace producentowi i autorowi zastosowanej technologii łupin izolacyjnych wykonanych wraz ze zespolonym płaszczem. Przeprowadzona wstępna analiza wybranego odcinka sieci napowietrznej do wymiany izolacji pozwoliła na ograniczenie strat na przesyle o około 47%. Wyeliminowanie tak znaczącej wartości strat ciepła zostało udokumentowane ponownym wykonaniem zdjęć termowizyjnych tego odcinka sieci.

Podjęmowane przez kadrę zarządzającą MPEC-Rzeszów decyzje obejmujące kompleksowe podejście do eksploatacji napowietrznych sieci ciepłowniczych poprzez wdrażanie planu sukcesywnej wymiany izolacji termicznej wraz z zabezpieczeniem konstrukcji nośnych stanowi wyraźny efekt w postaci redukcji strat ciepła na przesyle, a także otwiera nowe możliwości dla dalszego ich wykorzystania w przyszłości. Przyszłość ta nie kończy się na zapewnieniu niezawodności i bezpieczeństwa dostaw ciepła, lecz także pozwala zainicjować nowe kierunki transformacji energetycznej i dekarbonizacji systemu ciepłowniczego miasta Rzeszowa.

Jednym z kolejnych aspektów pozwalającym na zapewnienie niezawodności dostaw ciepła jest prowadzenie odpowiedniej eksploatacji sieci ciepłowniczej poprzez diagnozowanie stanu technicznego i eliminacja strat nośnika ciepła. Zagrożeniem dla ciągłości pracy sieci są awarie wywołane korozją zewnętrzną rurociągów, wynikającą z zawilgocenia izolacji. W warunkach pracy systemu ciepłowniczego miasta Rzeszowa kluczowe dla bezawaryjno-

ści stało się wdrożenie nowoczesnych metod diagnostycznych (Babiarz i in., 2024; MPEC, 2026): wykorzystanie termowizji lotniczej, stosowanie systemów alarmowych oraz kontrola ubytków wody sieciowej.

- Lotnicze zdjęcia termowizyjne wraz z opracowanymi raportami pozwalają na zlokalizowanie występujących anomalii temperaturowych w terenie na trasie sieci ciepłowniczej zarówno podziemnej jak i napowietrznej. Dzięki temu służby eksploatacyjne mogą wykryć miejsca potencjalnej awarii zanim dojdzie do rozszczelnienia rurociągu.
- Zastosowano system alarmowy RATMON, poprzez zamontowane detektory RAT-1 oraz RAT-2, które swoim zasięgiem obejmują łącznie około 100 km sieci preizolowanych (MPEC, 2026). Stały monitoring stanu izolacji pozwala na natychmiastowe wykrycie zawilgocenia złącza lub płaszcza, dając czas na zaplanowanie naprawy bez konieczności wprowadzania nagłych wyłączeń awaryjnych.
- Ciągły nadzór nad bilansowaniem masowym czynnika w układzie systemu pozwala natychmiast wychwycić ponadnormatywne ubytki i zlokalizować nieuszczelnności.

Niezawodność miejskiego systemu ciepłowniczego weryfikuje się także w sytuacjach kryzysowych – podczas nagłych awarii głównych i rozdzielczych sieci ciepłowniczych lub podczas realizacji zadań inwestycyjno – remontowych. W codziennej praktyce eksploatacyjnej MPEC-Rzeszów wypracowano procedury minimalizujące skutki przerw w dostawach ciepła.

- Wykorzystanie układu pierścieniowego. Geometria sieci pozwala na szybkie przekierowanie strumienia czynnika ciepłowniczego alternatywnymi trasami (zamknięcie odpowiednich sekcji armatury odcinającej



Rysunek 2. Wymiana izolacji na rurociągu zasilającym - stan po wymianie (MPEC, 2026)

Figure 2. Replacing the insulation on the supply pipeline - condition after replacing (MPEC, 2026)



Rysunek 3. Sieć ciepłownicza tymczasowa w trakcie remontu sieci ciepłowniczej przy ul. Trembeckiego w Rzeszowie (MPEC, 2026)

Figure 3. Temporary heat supply system during renovation of heat supply system on Trembeckie Street in Rzeszów (MPEC, 2026)

i otwarcie obejść). Pozwala to na wyłączenie uszkodzonego odcinka bez odcinania całych osiedli mieszkaniowych lub rejonów zasilania.

- Zastosowanie mobilnych kotłowni kontenerowych. W przypadkach wystąpienia awarii lub planowanych prac inwestycyjno - remontowych, kluczowe dla utrzymania ciągłości dostaw ciepła (szczególnie w sezonie grzewczym) jest szybkie wdrożenie gotowych do pracy kotłowni kontenerowych, które tymczasowo zasilają obiekty krytyczne (jednostki oświaty, budynki wielorodzinne). Mobilne kotłownie na paliwo płynne o mocy, odpowiednio: 250 lub 120 kW, są zabudowane w formie kontenerowej, umożliwiające ich przetransportowanie przy pomocy przyczepy niskopodwozowej w miejsce podłączenia do istniejącej sieci ciepłowniczej lub węzła cieplnego.
- Budowa sieci tymczasowych wykonanych z węży odpornych na wysokie temperatury wody sieciowej. Jest to alternatywne rozwiązanie do mobilnych kotłowni kontenerowych, umożliwia zachowanie ciągłości dostaw ciepła w okresie letnim do poszczególnych węzłów cieplnych, z chwilowymi jej przerwami na dokonanie tzw. wpalenia do istniejącej sieci ciepłowniczej. Terminy tych przerw są skoordynowane z przedstawicielami odbiorców tak, aby ich uciążliwość w czasie była jak najkrótsza.

Systemy Informacji Geograficznej (w skr. GIS) stanowią dziś fundament ewidencji infrastruktury ciepłowniczej, oferując centralną bazę danych geoprzestrzennych o przebiegu rurociągów i stanie technicznym obiektów (Babiarz & Szymański, 2021; Jachura & Sekret, 2013). Dzięki połączeniu informacji technicznych z ich lokalizacją przestrzenną, przedsiębiorstwa zyskują narzędzie wspierające procesy decyzyjne. Bazy danych GIS pełnią rolę głównego źródła informacji dla specjalistycznych programów obliczeniowych, co pozwala na płynne przejście od statycznej ewidencji do aktywnego modelowania pracy całego systemu w czasie rzeczywistym (Gębski & Niemyjski, 2023; Niemyjski, 2020). Modelowanie hydrauliczne przy użyciu programów komputerowych pozwala na zarządzanie ryzykiem poprzez przeprowadzanie symulacji stanów istniejących i planowanych w przyszłości a także analizę

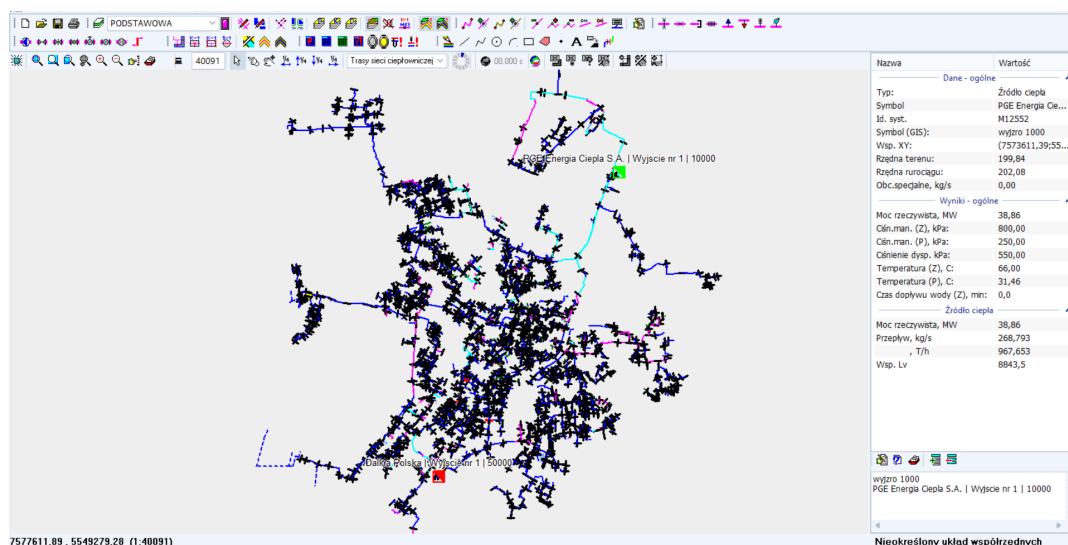
przepustowości sieci. Proces technicznej integracji GIS z modułami obliczeniowymi, takimi jak program Auditor SCW, opiera się na dwukierunkowej wymianie danych i tworzeniu matematycznego zapisu topologii sieci w postaci modelu. Model ten uwzględnia charakterystykę hydrauliczną poszczególnych elementów, w tym źródeł ciepła, pompowni, węzłów cieplnych i armatury, przeliczając straty ciśnienia i temperatury dla zadanych warunków zapotrzebowania na moc (Rysunek 4). Niezwykle ważnym etapem jest tu wielostopniowa weryfikacja poprawności importowanych danych, co zapewnia spójność modelu ze stanem rzeczywistym i jest krytyczne dla wiarygodności obliczeń w dużych i skomplikowanych systemach miejskich o wielokilometrowych magistralach.

Z punktu widzenia funkcji dyspozytora sieci ciepłowniczej, określonej w Rozporządzeniu w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych, sieć ciepłownicza musi charakteryzować się prawidłowym jej zarządzaniem i eksploatacją a także odpowiednim prowadzeniem ruchu sieciowego (Rozporządzenie w sprawie funkcjonowania systemów ciepłowniczych, tj. Minister Gospodarki, 2007). W realnej eksploatacji kadra inżynierska MPEC-Rzeszów dąży do:

- utrzymania optymalnego ciśnienia dyspozycyjnego w węzłach końcowych - unikanie nadmiernych ciśnień w rejonach bliskich źródeł ciepła przy jednoczesnym zagwarantowaniu odpowiedniego ciśnienia dla najbardziej oddalonych odbiorców, tzw. „końcówki sieci”, co zostało przedstawione na Rysunku 4.
- zarządzania przepływami przy zmianach parametrów – redukcja temperatur zasilania w sezonie letnim lub okresach przejściowych wymusza większe przepływy. Eksploatacyjnie oznacza to konieczność ścisłej kontroli pracy obiektów pompowych oraz dławienia lub regulacji tam, gdzie prędkości czynnika mogłyby generować hałas, kawitację lub przyspieszone zużycie armatury regulacyjnej.

Systemy ciepłownicze powinny swoim zasięgiem obejmować tereny zasilania o gęstym zurbanizowaniu i obciążeniu cieplnym. Proces przyłączania nowych terenów inwestycyjnych w Rzeszowie obejmuje wiele obszarów, w szczególności obszary o zabudowie mieszkalnej wielorodzinnej. Jest to

bardzo pozytywny status dla rozwoju systemu ciepłowniczego. Tereny sąsiadujące z siecią ciepłowniczą miasta Rzeszowa, zwłaszcza zlokalizowane po jego zachodniej stronie leżą na terenach pagórkowatych, co stanowi wyzwanie dla zapewnienia odpowiedniego ciśnienia dyspozycyjnego. W tym celu MPEC-Rzeszów postawiło na terenie osiedla Bł. Karoliny przepompownię sieciową, zlokalizowaną w zabudowie kontenerowej. Jej zadaniem



Rysunek 4. Model hydrauliczny systemu w SCW 4 (MPEC, 2026)
Figure 4. Hydraulic model of the system in SCW 4 (MPEC, 2026)

jest podwyższenie ciśnienia na rurociągu zasilającym poprzez układ pompowy i spiętrzenie ciśnienia w rurociągu powrotnym przed zamontowanym zaworem upustowym. Obszar ten został przedstawiony na Rysunku 5 kolorem niebieskim (lewa część rysunku – stan przed podniesieniem ciśnienia w przepompowni).

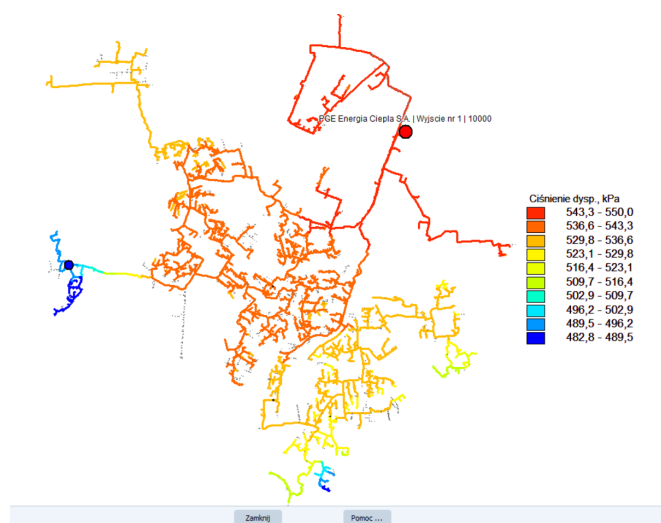
Kolejnym ważnym aspektem w niezawodności i bezpieczeństwie dostaw ciepła w systemie ciepłowniczym miasta Rzeszowa, w szczególności w okresie letnim, jest transport nośnika ciepła do odbiorców końcowych dla potrzeb podgrzewu zimnej wody wodociągowej do celów ciepłej wody użytkowej. Okres letni charakteryzuje się dwoma ważnymi czynnikami, które mają zdecydowany wpływ na dostawy ciepła do odbiorców końcowych. Są to temperatura zimnej wody dostarczanej do węzłów cieplnych poprzez sieć wodociągową oraz czas dopływu czynnika grzewczego poprzez sieci ciepłownicze. Czynnikiem pierwszy, czyli temperatura zimnej wody wodociągowej jest niezależna od dostawcy ciepła, jednakże ma ogromny wpływ na proces transformacji temperaturowej odbywający się na wymiennikach ciepła. Czynnikiem drugi, czyli czas dopływu czynnika grzewczego jest zależny od dostawcy ciepła, jakim jest MPEC-Rzeszów dla systemu ciepłowniczego miasta Rzeszowa. Kadra inżynierska pracująca w MPEC-Rzeszów stale monitoruje zarządzanie systemem ciepłowniczym poprzez pracę jej dyspozytorów. Mając na uwadze obowiązujące standardy jakościowe obsługi odbiorców końcowych konieczne jest dostarczanie nośnika ciepła do węzłów cieplnych o odpowiedniej temperaturze zasilania (Rozporządzenie w sprawie funkcjonowania systemów ciepłowniczych, tj. Minister Gospodarki, 2007). Kluczowym zagadnieniem jest właśnie czas dopływu wody do odbiorców końcowych, który został przedstawiony na Rysunku 6 oraz Rysunku 7. Im krótszy czas dopływu czynnika grzewczego do odbiorców końcowych, tym mniejszy jest spadek temperatury na zasilaniu wody sieciowej. Na Rysunku 6 możemy zaobserwować fakt, iż czas dopływu wody sieciowej od źródła ciepła do odbiorców końcowych wynosi średnio do 7 godzin. Z uwagi na rozbudowany system ciepłowniczy miasta czasu dopływu wody sieciowej wydłuża się do 14 godzin, co jest spowodowane

układem promienistym sieci ciepłowniczej na jej końcówkach, brakiem pierścieniowego, drugostronnego zasilania.

Mając na uwadze niezawodność i bezpieczeństwo dostaw ciepła należy zwrócić szczególną uwagę na współpracę źródeł ciepła z dyspozytorami zarządzającymi siecią ciepłowniczą. Specyfika dostaw ciepła w okresie letnim dla potrzeb podgrzewu zimnej wody wodociągowej wymaga uwzględnienia opóźnienia transportowego. Zapewnienie wymaganej temperatury zasilania nośnika ciepła ma swój początek od źródła ciepła poprzez sieć ciepłowniczą aż do odbiorcy końcowego. Specyfika użytkowania potrzeby cieplnej przez odbiorców końcowych jaką jest ciepła woda użytkowa, przygotowywana jest w węzłach cieplnych poprzez podgrzew zimnej wody wodociągowej. Doświadczenie eksploatacyjne kadry inżynierskiej MPEC-Rzeszów wskazuje na występowanie trzech szczytowych momentów wykorzystania mocy oraz większego zużycia energii cieplnej dla potrzeb ciepłej wody użytkowej. Są to: szczyt poranny (pomiędzy godz. 6 a 8 rano), szczyt popołudniowy (pomiędzy godz. 15 a 17) oraz szczyt wieczorny (pomiędzy godz. 20 a 22). Jest to szczególnie ważne w kontekście optymalnej pracy źródeł wytwórczych, utrzymywania odpowiedniej temperatury zasilania w sieci ciepłowniczej, zapewnienia standardów jakościowych dostawy ciepła do odbiorców końcowych oraz minimalizacji strat ciepła na przesyle.

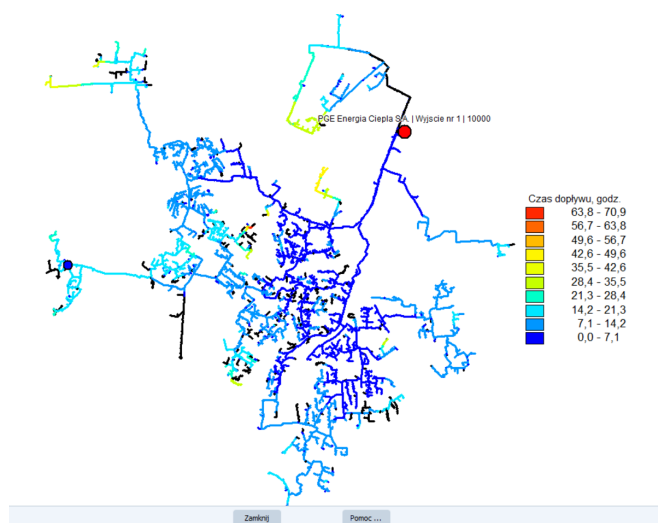
Podsumowanie

Kluczem w zapewnieniu odpowiedniej ochrony i bezpieczeństwa dostaw ciepła jest równowaga między wizją, rozwojem a możliwościami technicznymi w zakresie eksploatacji sieci ciepłowniczej. Transformacja systemów ciepłowniczych jest koniecznością, przed którą przedsiębiorstwa ciepłownicze nie uciekną, jednak jej powodzenie zależy od zaakceptowania przyjętych rozwiązań. Obecnie, gwałtowne przyspieszenie procesów dekarbonizacyjnych stawia sektor ciepłowniczy w trudnym położeniu, wymagając wdrażania głębokich zmian strukturalnych i funkcjonalnych w bardzo krótkim czasie. Kadra inżynierska odpowiedzialna za codzienną eksploatację i dyspozycję sieci, wyraźnie argumentuje, że miejski system ciepłowni-



Rysunek 5. Ciśnienie dyspozycyjne dla obszaru zasilania ze źródła ciepła Nr 1 (MPEC, 2026)

Figure 5. Available pressure for the supply area from heat source No. 1 (MPEC, 2026)



Rysunek 6. Czas dopływu wody sieciowej do odbiorców końcowych (MPEC, 2026)

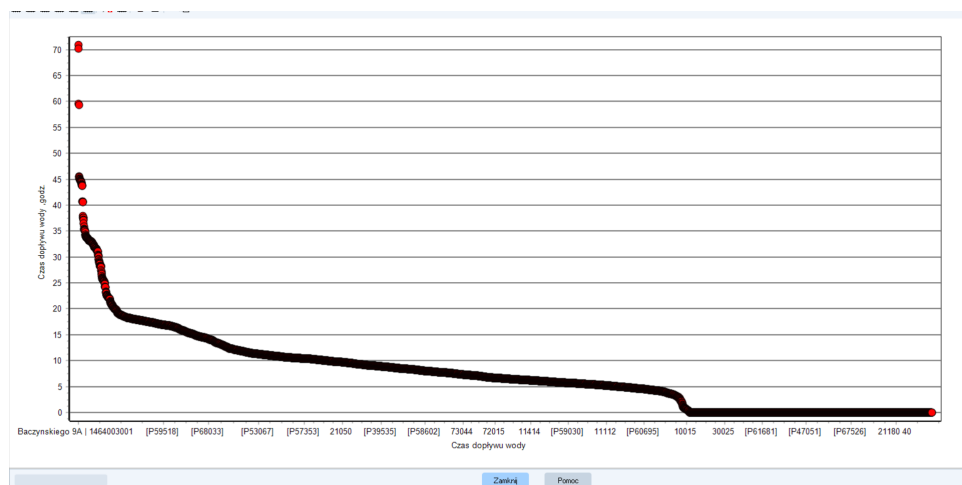
Figure 6. District heating water time to end users (MPEC, 2026)

czy nie jest strukturą podatną na natychmiastowe modyfikacje. Posiada on swoją fizyczną, hydrauliczną i termodynamiczną specyfikę, która przy gwałtownym wymuszaniu zmian parametrów pracy po prostu zasygnalizuje awarię. Przyszłość ciepłownictwa – również tego w wymiarze lokalnym, rzeszowskim – leży w integracji z systemami elektroenergetycznymi. System ciepłowniczy ma pełne prawo i możliwości, by stać się gigantycznym, naturalnym buforem bezpieczeństwa dla krajowego systemu elektroenergetycznego poprzez akumulację ciepła w okresach nadpodaży energii elektrycznej. Aby jednak ten scenariusz mógł się zrealizować, decydenci muszą zapewnić inżynierom czas na rzetelne zaprojektowanie, przetestowanie i wdrożenie tych mechanizmów.

Bezpieczeństwo i niezawodność dostaw ciepła do odbiorców końcowych muszą pozostać absolutnym priorytetem, niepodlegającym kompromisom na rzecz skróconych kalendarzy wdrażania nowych strategii. Tylko ewolucyjne, podparte precyzyjnymi analizami hydraulicznymi i technicznymi wprowadzanie nowych technologii pozwoli przejść przez proces transformacji energetycznej bez ryzyka dla infrastruktury krytycznej miast. Fizyki sieci ciepłowniczej nie da się oszukać pośpiesznymi założeniami – i to od tej prawdy powinna zaczynać się każda merytoryczna dyskusja o przyszłości polskiej energetyki ciepłej. Przedstawione w artykule praktyczne rozwiązania wpisują się w zagadnienia obejmujące niezawodność i bezpieczeństwo dostaw ciepła do odbiorców końcowych poprzez odpowiednio prowadzoną eksploatację sieci ciepłowniczej miasta Rzeszowa. Wzajemna współpraca wytwórców ciepła, MPEC-Rzeszów Sp. z o.o. jako operatora sieci ciepłowniczej oraz odbiorców ciepła zapewni niezawodne, bezpieczne i w pełni efektywne energetycznie dostawy ciepła w dobie nadchodzącej transformacji energetycznej.

Bibliografia

- Babiarz B. & W. Szymański. (2021). Perspektywa zarządzania bezpieczeństwem zaopatrzenia w ciepło. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 52 (10):15-19. <https://doi.org/10.15199/9.2021.10.2>
- Babiarz B., Nowak L., Kotowicz D. (2024). Efektywny energetycznie system ciepłowniczy z perspektywy MPEC-Rzeszów Sp. z o.o.. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. 55 (28-39). <https://doi.org/10.15199/9.2024.7-8.4>
- Błaszczuk A., Majchrzak-Kucęba I., (2022). Czysta Energia



Rysunek 7. Wykres czasu dopływu wody sieciowej do odbiorców końcowych (MPEC, 2026)
Figure 7. Diagram of the time it takes for district water to reach end users (MPEC, 2026)

i Środowisko. Monografia Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

- Gębski W. & Niemyjski O. (2023). GIS jako istotny element Zintegrowanego Systemu Informatycznego dla przedsiębiorstw ciepłowniczych. *Instal*, Nr 11/2023. <https://doi.org/10.36119/15.2023.11.4>
- Jachura A. & Sekret M., (2013). Efektywność energetyczna miejskiego systemu ciepłowniczego. *Instal*, Nr 7-8/2013.
- Minister Gospodarki. (2007). Rozporządzenie w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych (Dz.U. 2007, nr 16, poz. 92).
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2021). Polityka energetyczna Polski do 2040 r. (Załącznik do uchwały nr 22/2021 Rady Ministrów z dnia 2 lutego 2021 r.).
- MPEC. (2026). Informacje i dane statystyczne udostępnione przez MPEC – Rzeszów Sp. z o.o. (Niepublikowane dane wewnętrzne)
- Niemyjski O. (2020). Kalibracja modelu hydraulicznego sieci ciepłowniczej. *Instal*, Nr 3/2020. <https://doi.org/10.36119/15.2020.3.1>
- Osmólski J. (2026). Czas na decyzję się kończy! Ostatnia prosta branży energetyczno-ciepłowniczej przed wdrożeniem dyrektyw IED 2.0 i EED. *Magazyn Nowa Energia*. Nr 3 (104):12-14.
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (1997). Ustawa z dnia 22 sierpnia 1997 r. o ochronie osób i mienia (tekst jednolity Dz.U. z 1997 nr 114 poz. 740)
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2024a). Ustawa o ochronie ludności i obronie cywilnej (Dz.U. 2024, poz. 1907).
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2026a). Ustawa o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa (Dz.U. 2018, poz. 1560).
- Sejm Rzeczypospolitej Polskiej. (2026c). Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (tekst jednolity Dz.U. z 2026 r. poz. 574).
- URE. (2026). Energetyka ciepła w liczbach – 2025, *Departament Regulacji Energetyki, Urząd Regulacji Energetyki*

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.*

Zapobieganie przed zadymieniem przedsionków przeciwpożarowych. Jak uniknąć problemów eksploatacyjnych na etapie koncepcji projektowej



Mgr inż. Grzegorz Sypek

Etex Poland Sp. z o.o.

Wstęp

W niniejszym artykule opisano najważniejsze zagadnienia związane z praktyką projektową oraz jej wpływem na eksploatację systemów zapobiegania przed zadymieniem przedsionków przeciwpożarowych (przykładowo Rysunek 1). Standardy projektowe i korzystający z nich projektanci instalacji branży sanitarnej najczęściej uwagi poświęcają problematyce ochrony klatek schodowych, tymczasem to właśnie prawidłowo zabezpieczone przedsionki przeciwpożarowe stanowią pierwszą i często skuteczną linię obrony przed zadymieniem. Niewielkie służy, utrzymywane w nadciśnieniu w stosunku do przyległych do nich poziomych dróg ewakuacyjnych umożliwiają skuteczną kontrolę rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, chroniąc klatki schodowe i szyby dźwigowe w zasadzie niezależnie od wysokości budynku. Doświadczenia prak-

tyczne z kalibracji na etapie rozruchów czy pomiary wykonywane w ramach przeglądów okresowych systemów różnicowania ciśnienia potwierdzają, że napowietrzanie przestrzeni o małych kubaturach stanowi ogromne wyzwanie dla układu pomiaru i regulacji ciśnienia. Wynika to głównie z wysokiej szczelności przedsionków, jak również dużej zmienności przepływów powietrza podczas ewakuacji. Z pomocą dla projektantów przychodzą tutaj doświadczenia praktyczne z pomiarów w skali rzeczywistej, które można z powodzeniem wykorzystać już na etapie opracowywania koncepcji projektowej.

Wymagania prawne

Wymagania dotyczące wielkości, obudowy i sposobu ochrony przedsionków przeciwpożarowych są opisane w Dziale VI. Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), dotyczącym bezpieczeństwa pożarowego odpowiednio w § 232 i § 246:

- **§ 232 Ust. 3.** *Przedsionek przeciwpożarowy powinien mieć wymiary rzutu poziomego nie mniejsze niż $1,4 \times 1,4$ m, ściany i strop, a także osłony lub obudowy przewodów i kabli elektrycznych z wyjątkiem wykorzystywanych w przedsionku oraz z wyjątkiem zespołów kablowych, o których mowa w § 187 ust. 3 – o klasie odporności ogniowej co najmniej E I 60 wykonane z materiałów niepalnych oraz powinien być zamykany drzwiami i wentylowany co najmniej grawitacyjnie, z zastrzeżeniem § 246 ust. 2 i 3.*
- **§ 246 Ust. 1.** *W budynku wysokim (W) i wysokościowym (WW), z zastrzeżeniem ust. 4, należy zapewnić możliwość ewakuacji do co najmniej dwóch klatek schodowych, które powinny być obudowane i oddzielone od poziomych dróg komunikacyjnych lub ewakuacyjnych oraz pomieszczeń, przedsionkiem przeciwpożarowym, odpowiadającym wymaganiom określonym w § 232. Ust. 2. Klatki schodowe i przedsionki przeciwpożarowe, stanowiące drogę ewakuacyjną w budynku wysokim (W) dla stref pożarowych innych niż ZL IV i PM oraz w budynku wysokościowym (WW), powinny być wyposażone w urządzenia zapobiegające ich zady-*



Rysunek 1. Przykładowy przedsionek przeciwpożarowy klatki schodowej z otworem transferowym

mieniu. Ust. 3. Klatki schodowe i przedsionki przeciwpożarowe, stanowiące drogę ewakuacyjną w budynku wysokim (W) dla strefy pożarowej PM, powinny być wyposażone w urządzenia zapobiegające zadymieniu lub samoczynne urządzenia oddymiające uruchamiane za pomocą systemu wykrywania dymu.

Uproszczony algorytm projektowania

Spełnienie wymagań prawnych, to warunek konieczny i dalece niewystarczający do opracowania spójnej koncepcji projektowej. Przed przystąpieniem do projektowania warto przeanalizować architekturę budynku i korespondujący z nią globalny schemat systemu wentylacji pożarowej, z uwzględnieniem scenariusza rozwoju pożaru oraz scenariuszy ewakuacji i prowadzenia akcji ratowniczej. Taka analiza na wstępnym etapie prac koncepcyjnych umożliwia określenie prawidłowych założeń do projektowania oraz funkcji celu, które chcemy zrealizować poprzez dobór kluczowych komponentów systemu i określenie ich współdziałania w przypadku pożaru. W Tabeli 1 opisano wybrane etapy projektowania z komentarzem dotyczącym praktycznego znaczenia podejmowanych decyzji.

Strumień objętościowy powietrza, jaki trzeba dostarczyć do przedsionka przeciwpożarowego na potrzeby wytworzenia w nim projektowej wartości nadciśnienia oraz prędkości przepływu można obliczyć ze wzoru (1).

$$Q_0 = C_v \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P_R^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{m^3}{s} \rightarrow Q_C = C_v \cdot A_C \cdot \Delta P_R^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m^3}{s} \quad (1)$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza, kg/m^3 (domyślnie dla temperatury 20 °C)
- C_v – współczynnik wypływu aerodynamicznego, – (z przedziału 0,60–0,90)
- A_C – łączna powierzchnia szczelności w przedsionku, m^2
- ΔP – projektowa wartość różnicy ciśnienia, Pa (domyślnie 30–45 Pa)
- R – współczynnik bezwymiarowy, – (2,0 dla obliczeń inżynierskich)

Wartość współczynnika wypływu aerodynamicznego zależy istotnie od lokalizacji otworu nawiewnego do przedsionka przeciwpożarowego oraz otwartych drzwi ewakuacyjnych. Dla większości standardowych aplikacji, do obliczeń, można przyjmować $C_v = 0,83$. Z wykorzystaniem tej zależności można wyznaczyć również wymaganą powierzchnię efektywną otworów transferowych z przedsionka przeciwpożarowego lub przestrzeni open-space.

Wymiarowanie przewodów nawiewnych i komponentów służących do odprowadzenia powietrza należy wykonać dla projektowych wydajności wentylatorów przy założeniu granicznych prędkości przepływu w instalacji.

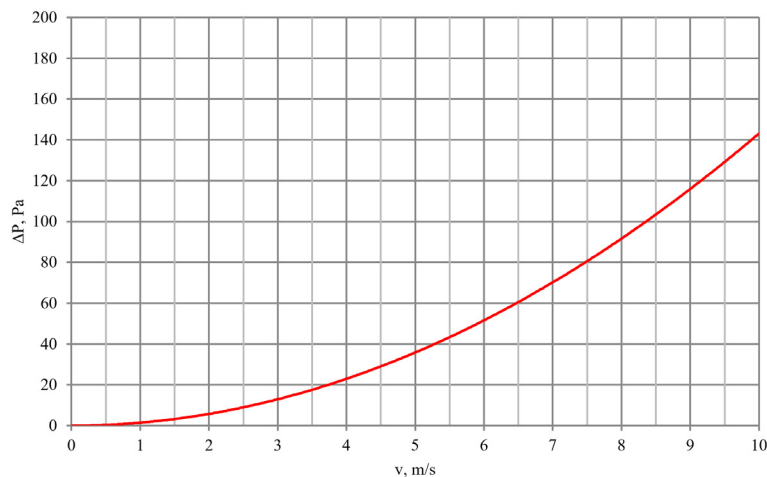
Sposoby doprowadzenia powietrza kompensacyjnego

Doprowadzenie powietrza kompensacyjnego do oddymiania korytarza może być realizowane:

- bezpośrednio z przedsionka przeciwpożarowego poprzez otwory transferowe w ścianie pomiędzy przed-

Tabela 1. Wybrane etapy projektowania systemu różnicowania ciśnienia w przedsionkach przeciwpożarowych

Etap	Opis	Komentarz
Wybór standardu projektowego	W przeważającej liczbie projektów jest to norma PN-EN 12101-13:2022-09 (PKN, 2022)	Norma dopuszcza różne sposoby zabezpieczenia przedsionków przeciwpożarowych, dlatego należy je weryfikować pod kątem zgodności z WT.
Określenie parametrów pracy systemu	– 40 Pa ± 10 Pa – projektowa wartość nadciśnienia w przedsionku ppoż. – 1,0 m/s lub 2,0 m/s – projektowa prędkość przepływu powietrza z przedsionka ppoż. – 100 N – maksymalna siła potrzebna do otwarcia drzwi ewakuacyjnych do przedsionka ppoż.	Parametry pracy systemu powinny być dostosowane do specyfiki budynku oraz aranżacji kondygnacji. Z uwagi na sposób doprowadzenia powietrza do napowietrzania przedsionków ppoż. warto przewidzieć odpowiednią tolerancję wartości projektowej.
Wybór ciśnienia odniesienia	Wydajność wentylatorów napowietrzających lub oddymiających jest regulowana automatycznie na podstawie (+) – (–) mierzonej w sposób ciągły wartości różnicowego ciśnienia statycznego.	Wybór reprezentatywnego ciśnienia odniesienia (–) ma kluczowe znaczenie dla prawidłowej pracy systemu. Zwykle nadciśnienie w przedsionku ppoż. jest ustalane w odniesieniu do korytarza na kondygnacji, na której wykryto pożar.
Określenie sposobu doprowadzenia powietrza do przedsionków ppoż.	W większości projektów powietrze do przedsionków ppoż. jest doprowadzone poprzez niezależny przewód lub szacht nawiewny w klasie odporności ogniowej EI S120 z otworami nawiewnymi zabezpieczonymi klapami wentylacji pożarowej.	W przypadku braku możliwości doprowadzenia powietrza w opisany sposób możliwe jest napowietrzanie przedsionków ppoż. pośrednio poprzez odpowiednie zabezpieczone otwory transferowe z chronionej nadciśnieniowo klatki schodowej.
Odprowadzenie powietrza z kondygnacji	Odprowadzenie powietrza dla różnicowania ciśnienia może być realizowane poprzez wyciąg mechaniczny lub grawitacyjny poprzez szacht lub okno. Zwykle odprowadzenie powietrza jest zapewnione przez stałowydawkową instalację oddymiania korytarza.	W przypadku zastosowania mechanicznego odprowadzenia powietrza konieczne jest zapewnienie doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do oddymiania w proporcji bliskiej 1 do 1.
Uwzględnienie scenariusza ewakuacji i akcji ratowniczej	W przypadku napowietrzania przedsionków ppoż. wiąże się to z założeniem jednoczesności napowietrzania przedsionków oraz liczby otwartych do przedsionka ppoż. drzwi ewakuacyjnych.	W przypadku przedsionków ppoż., do których prowadzą więcej niż jedno drzwi na potrzeby prowadzenia akcji gaśniczej można przyjąć otwarcie tylko jednych drzwi.



Rysunek 2. Zależność różnicy ciśnienia w funkcji prędkości przepływu powietrza – obliczenia własne na podstawie wzoru (1) z normy PN-EN 12101-13

Tabela 2. Zestawienie różnic ciśnienia i średnich prędkości przepływu powietrza przez otwór o powierzchni 1,0 m² wg. normy PN-EN 12101-13

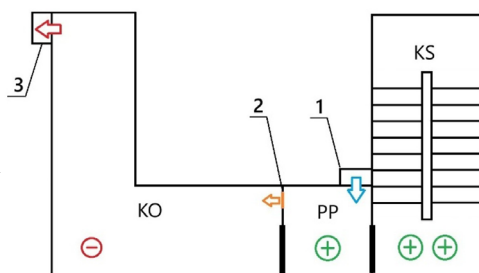
Różnica ciśnienia ΔP, Pa	Średnia prędkość przepływ powietrza v, m/s
1	0,83
5	1,86
30	4,55
50	5,87

Tabela 3. Zalecane prędkości przepływu do wymiarowania przewodów systemu różnicowania ciśnienia – praktyka projektowa

Przewód/szacht, –	Prędkość przepływu w przewodzie v, m/s
nawiew do przedsionka ppoż.	8
mechaniczne odprowadzenie powietrza	10
grawitacyjne odprowadzenie powietrza	2

gdzie:

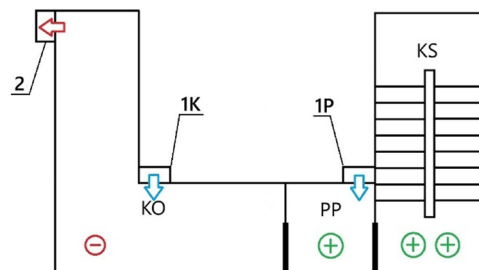
- KS – klatka schodowa
- PP – przedsionek przeciwpożarowy
- KO – korytarz
- 1 – szacht napowietrzający przedsionek przeciwpożarowy
- 2 – otwór transferowy w ścianie
- 3 – wyciąg mechaniczny (odprowadzenie powietrza)



Rysunek 3. Schemat ideowy systemu zapobiegania przed zadymieniem przedsionka przeciwpożarowego z transferem powietrza kompensacyjnego do korytarza. Źródło: opracowanie własne

gdzie:

- KS – klatka schodowa
- PP – przedsionek przeciwpożarowy
- KO – korytarz
- 1P – szacht napowietrzający przedsionek przeciwpożarowy
- 1K – szacht doprowadzający powietrze kompensacyjne do korytarza
- 2 – wyciąg mechaniczny (odprowadzenie powietrza)



Rysunek 4. Schemat ideowy systemu zapobiegania przed zadymieniem przedsionka przeciwpożarowego z dodatkowym szachtem doprowadzającym powietrze kompensacyjne do korytarza. Źródło: opracowanie własne

sionkiem, a korytarzem (Rysunek 3),

- z wykorzystaniem dodatkowego szachtu nawiewnego lub napływu grawitacyjnego powietrza kompensacyjnego bezpośrednio do korytarza (Rysunek 4),

Typowe systemy różnicowania ciśnienia są projektowane, tak aby w przestrzeni oddymianych mechanicznie dróg ewakuacyjnych panowało niewielkie podciśnienie np. od –10 do –5 Pa. W przypadku zastosowania dodatkowego szachtu kompensacyjnego do korytarza możliwe jest również zaprojektowanie rozwiązania, które umożliwia wytworzenie w korytarzu niewielkiej wartości nadciśnienia w stosunku do przyległych pomieszczeń, co może zapobiegać napływowi dymu przez nieszczelności z pomieszczenia objętego pożarem do korytarza. Brak rozszczelnienia ścian pomieszczeń chronionych nadciśnieniowo zapewnia potencjalnie najwyższą skuteczność w zakresie kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła. Jednocześnie szczelny przedsionek i duża zmienność projektowych strumieni objętościowych powietrza, dostarczanych do przedsionka wymaga zastosowania zaawansowanego układu regulacji odpornego na niegasnące oscylacje różnicy ciśnienia.

W projektach, w których nie ma możliwości zastosowania zaawansowanych układów automatyki kontrolno-pomiarowej zalecane jest ograniczanie dużej zmienności parametrów pracy systemu tj. projektowanie systemów możliwie bliskich stałowydatkowym. Przykład takiego rozwiązania zaprezentowano poniżej. W proponowanym wariancie przedsionek przeciwpożarowy jest napowietrzany pośrednio z klatki schodowej i wentylowany poprzez układ dwóch ściennych transferów powietrza. Projektowa prędkość przepływu powietrza z przedsionka do korytarza jest osiągnięta przy jednoczesnym otwarciu drzwi ewakuacyjnych prowadzących do klatki schodowej. Powietrze kompensacyjne do oddymiania jest doprowadzone przez niezależny szacht, bezpośrednio do korytarza. Takie rozwiązanie wymaga precyzyjnej kontroli rozkładu ciśnienia w klatce schodowej oraz dokładnego zwymiarowania powierzchni efektywnych otworów transferowych. W konsekwencji na etapie formułowania złoża projektowych warto przewidzieć wyższe tolerancje wartości nadciśnienia w przedsionkach przeciwpożarowych np. 30 Pa ± 20 Pa.

Praktyczne wskazówki

Projektowanie i eksploatacja systemów różnicowania ciśnienia stanowi duże wyzwanie, szczególnie w przypadku budynków o skomplikowanej architekturze. Niektóre problemy wynikają wprost ze specyfiki przestrzeni chronionych lub innych funkcji celu, niemniej jednak na podstawie doświadczeń praktycznych można wskazać również typowe problemy, które na odpowiednim etapie prac można rozwiązać w stosunkowo prosty sposób.

Wnioski

Prawidłowo zaprojektowany i eksploatowany system zapobiegania przed zadymieniem przedsionków przeciwpożarowych stanowi gwarancję utrzymania dróg ewakuacyjnych w stanie wolnym od dymu, niezależnie od wysokości budynku i realizowanego scenariusza ewakuacji. Na etapie koncepcji projektowej należy założyć możliwe do osiągnięcia w warunkach rzeczywistych tolerancje projektowej wartości nadciśnienia oraz przewidzieć sposób regulacji nadciśnienia w przedsionkach przeciwpożarowych. Podczas kalibracji systemu i pomiarów prowadzonych w ramach przeglądów okresowych szczególną uwagę należy poświęcić kondygnacjom o indywidualnej aranżacji i piętrům technicznym. Pomiarów parametrów funkcjonalnych systemu różnicowania ciśnienia w przedsionkach należy wykonać osobno dla każdej kondygnacji, zgodnie z kierunkiem ewakuacji.

Bibliografia

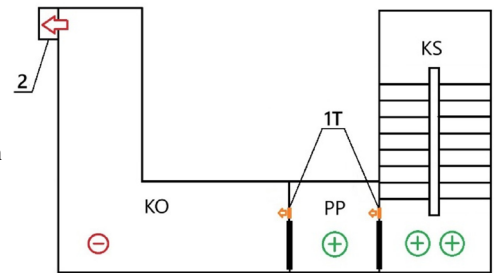
Minister Rozwoju i Technologii (2022). Obwieszczenie

Tabela 4. Projektowanie systemu różnicowania ciśnienia w przedsionkach przeciwpożarowych – jak rozwiązać typowe problemy.
Źródło: opracowanie własne

Problem	Rozwiązanie
Konieczność regulacji nadciśnienia w rozległej instalacji napowietrzania przedsionków ppoż.	Zaprojektować czujniki różnicy ciśnienia przedsionek – odniesienie w każdym z przedsionków ppoż.
Brak możliwości zaprojektowania przewodu nawiewnego do przedsionka ppoż.	Zaprojektować otwór transferowy z klatki schodowej do przedsionka ppoż. zwymiarowany dla projektowej różnicy ciśnienia np. 10 Pa
Brak miejsca na montaż klap transferowych w ścianie przedsionka ppoż.	Zaprojektować dodatkowy przewód/szacht kompensacyjny na kondygnacji poza przedsionkiem ppoż. Wentylator nawiewny może działać w układzie Slave – Master z wentylatorem napowietrzającym przedsionek ppoż.
Brak możliwości zaprojektowania szachtu do odprowadzenia powietrza	Zaprojektować otwierane automatycznie panele elewacyjne, rozmieszczone na co najmniej dwóch przeciwległych lub sąsiednich elewacjach
Brak możliwości doprowadzenia wymaganego strumienia objętościowego powietrza kompensacyjnego do oddymiania	Zaprojektować instalację oddymiania o zmiennym wydatku z wykorzystaniem wyłączników krańcowych. W takim przypadku należy zwrócić uwagę na zmienną skuteczność oddymiania
Brak możliwości rozprowadzenia poziomych przewodów oddymiających w korytarzu	Zaprojektować punkty wyciągowe bezpośrednio na szachtach oddymiających (wyciąg skoncentrowany). Punkty wyciągowe powinny być zlokalizowane w częściach korytarza odległych od przedsionków ppoż.
Konieczność rozszczelnienia elewacji budynku	Zaprojektować aktywny system napowietrzania przedsionków ppoż. umożliwiający kompensację parcia wiatru
Konieczność ograniczenia skokowego wzrostu nadciśnienia w przedsionku po zamknięciu drzwi ewakuacyjnych	Zaprojektować dodatkowe rozszczelnienie przedsionka ppoż. na przykład w postaci otworu transferowego zabezpieczonego przeciwpożarową klapą odcinającą o200 mm
Brak osiągnięcia projektowej prędkości przepływu powietrza z przedsionka przeciwpożarowego do przestrzeni użytkowej na kondygnacji objętej pożarem	Zwiększyć wydajność wentylatora oddymiającego służącego do odprowadzenia powietrza dla różnicowania ciśnienia
Przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej siły potrzebnej do otwarcia drzwi ewakuacyjnych	Zweryfikować siłę operacyjną netto drzwi z samozamykaczem i dokonać jego regulacji. Ograniczyć wydajność instalacji służącej do odprowadzenia powietrza
Zmiany aranżacji kondygnacji lub sposobu wykończenia podłóg	Wykonać pomiary weryfikacyjne różnicy ciśnienia, siły potrzebnej do otwarcia drzwi ewakuacyjnych i prędkości przepływu powietrza. Opcjonalnie usunąć wykładziny przylegające do skrzydeł drzwiowych
Podział korytarza ewakuacyjnego ściankami	Zaprojektować otwory transferowe umożliwiające połączenie hydrauliczne poszczególnych sekcji korytarza

gdzie:

KS – klatka schodowa
PP – przedsionek przeciwpożarowy
KO – korytarz
1T – zespół otworów transferowych do napowietrzania przedsionka przeciwpożarowego
2 – wyciąg mechaniczny lub upust grawitacyjny (odprowadzenie powietrza)



Rysunek 5. Schemat ideowy systemu zapobiegania przed zadymieniem przedsionka przeciwpożarowego z układem transferowym umożliwiającym pośredni napowietrzanie z klatki schodowej. Źródło: opracowanie własne

z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225)

PKN. (2022). PN-EN 12101-13:2022-09 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła – Część 13: Systemy różnicowania ciśnień (SRC) – Projektowanie i metody obliczeniowe, instalowanie, badania okresowe i konserwacja. Polski Komitet Normalizacyjny

Poprawa efektywności procesu pompowania na przykładzie Ciepłowni Malbork

Mgr inż. Grzegorz Grzyb¹

Dr inż. Andrzej Misiewicz²

Inż. Jacek Murawski³

¹ Wilo Polska Sp. z o.o.

² ZPME Energom s.c.

³ Elektromontaż Toruń Sp. z o.o.

Streszczenie

W artykule przedstawione zostały działania modernizacyjne w Ciepłowni Malbork, polegające na zmianie technologii pompowania. Pokazano stan przed modernizacją oraz zmiany modernizacyjne – przebudowa wewnętrznego układu technologicznego, dopasowanie pomp do wymagań oraz zmiany w układach zasilania, sterowania i regulacji. Zaprezentowano uzyskane efekty energetyczne, poparte pomiarami porównawczymi i rzeczywistą rejestracją zużycia energii.

Wstęp

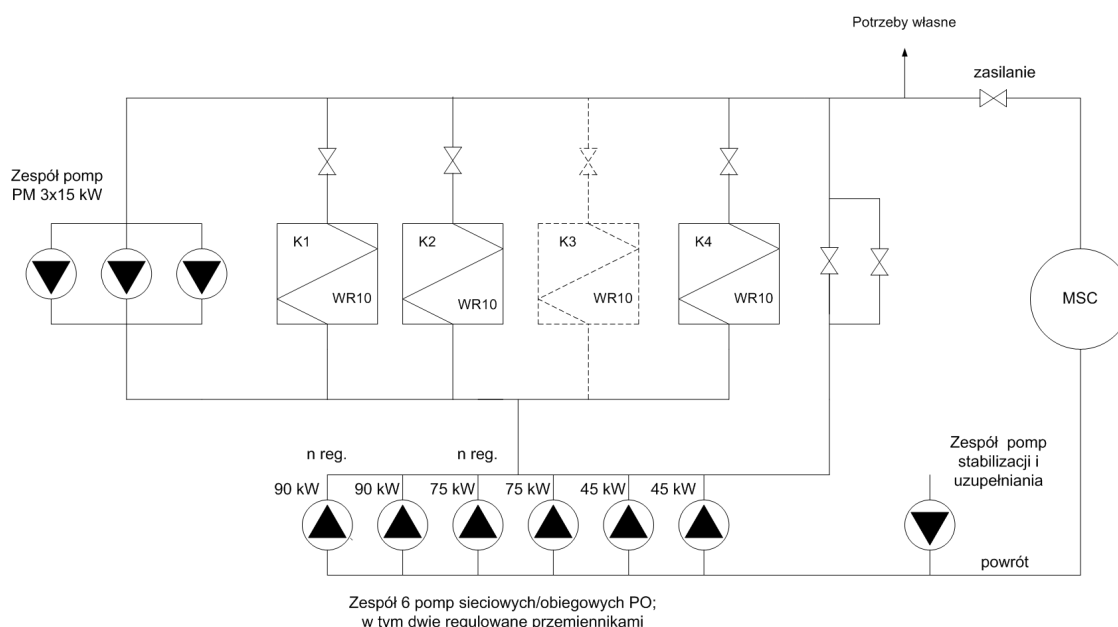
Układy pomp sieciowych ciepłowni muszą zapewnić wymagane ciśnienie dyspozycyjne m.s.c. oraz pokonać opory wewnętrzne instalacji źródła ciepła. Proces pompowania powinien gwarantować pracę układu przy jak najmniejszym poziomie strat energetycznych.

Przy pracy układów pompowych ciepłowni możemy wyróżnić straty:

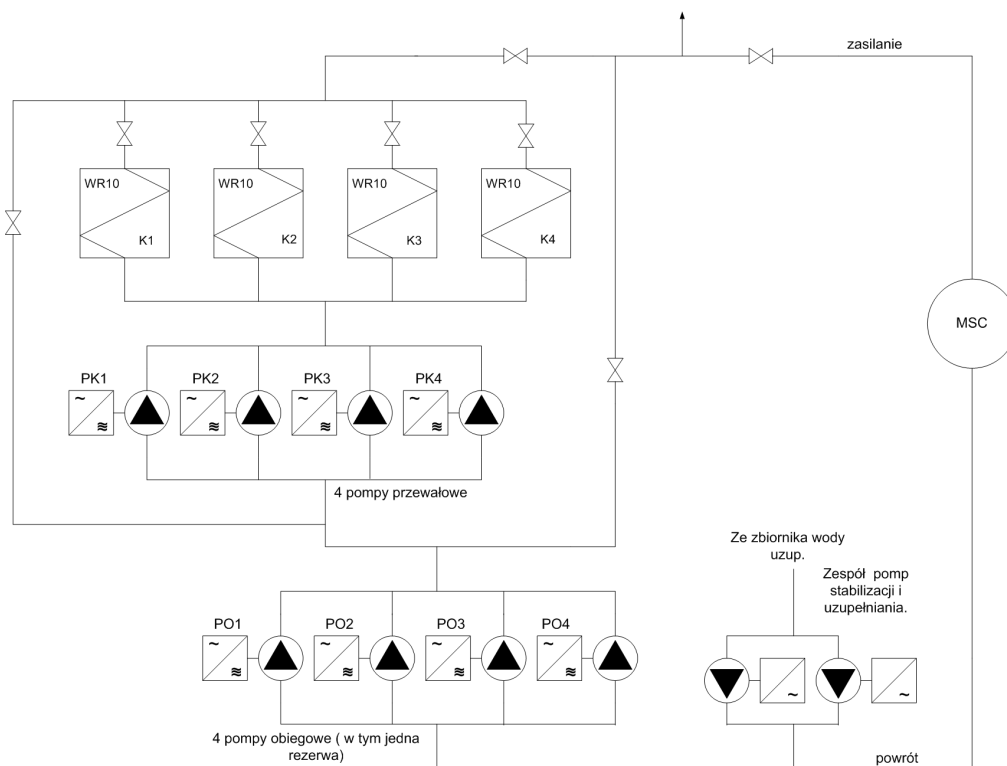
- wynikające z konfiguracji układu i przyjętej technologii (kotły i wymienniki oraz ich wzajemne połączenie, zmieszanie gorące, zmieszanie zimne),
- wynikające ze strat w urządzeniach transportu wody (pompy, silniki, napędy),

- wynikające ze strat hydraulicznych instalacji (opory przepływu źródła),
- wynikające ze współpracy źródła z siecią (dyspozycja i pozostałe parametry pracy sieci).

Pompy źródła ciepła oraz ich konfiguracja powinny być tak dobrane, aby zapewnić wymagane parametry sieci przy jak najmniejszym poziomie strat własnych. Jest to możliwe, gdy układ pompowy pracuje cały czas, lub przez większość czasu w pobliżu punktu najwyższej sprawności. Istotne jest, aby układ nie posiadał zbyt dużych nadwyżek parametrowych, które w eksploatacji muszą podlegać głębokiemu zregulowaniu, co zawsze prowadzi do spadku sprawności zespołów pompowych (pomp, silników i falowników).



Rysunek 1. Układ technologiczny i pompowy Ciepłowni Malbork przed modernizacją



Rysunek 2. Układ technologiczny i pompowy Ciepłowni Malbork po modernizacji

Modernizacja układu technologicznego ciepłowni

Układ technologiczny i pompowy Ciepłowni Malbork (Rysunek 1) był klasycznym układem z pompami sieciowymi (obiegowymi), podającymi wodę do miejskiej sieci ciepłowniczej poprzez zespół kotłów wodnych. Konieczne zmieszanie zimne realizowane było poprzez węzeł obejściowy kotłów. Wymagana temperatura wody na wlocie do kotłów była zapewniana przez zespół pomp zmieszania gorącego. Dwie pompy obiegowe były wyposażone w przemienniki częstotliwości.

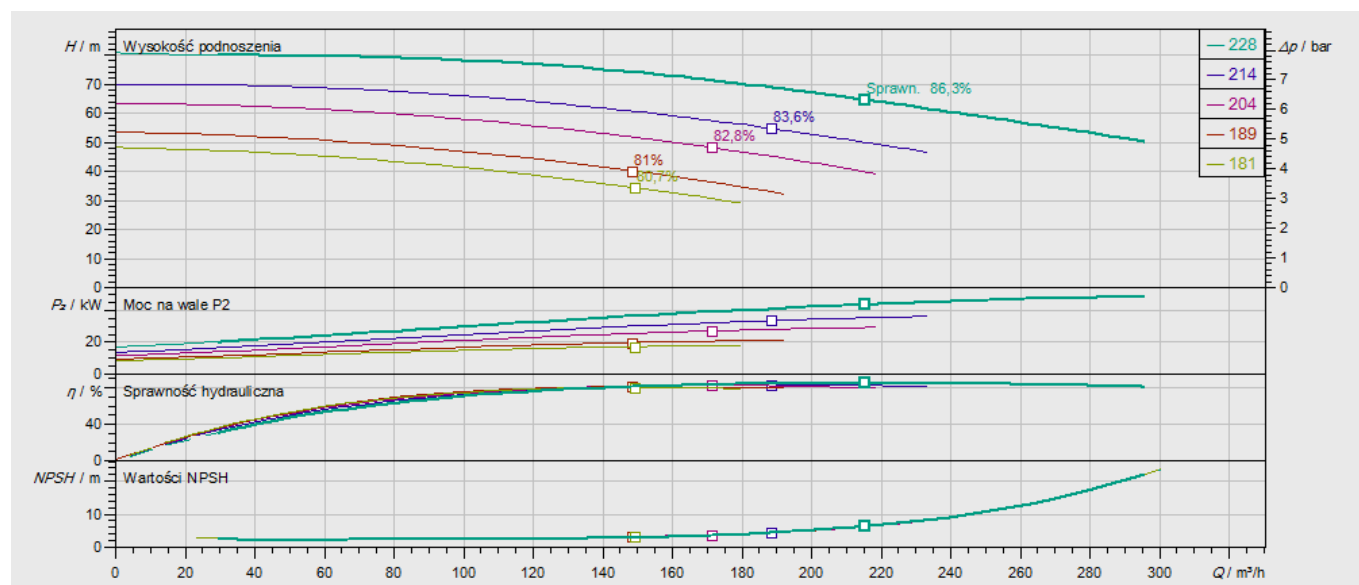
Analiza strat procesu pompowania wykazała, że główne straty układu są spowodowane niską sprawnością pomp

obiegowych, ich różnymi charakterystykami przepływu oraz stratą dławienia na węźle zmieszania zimnego.

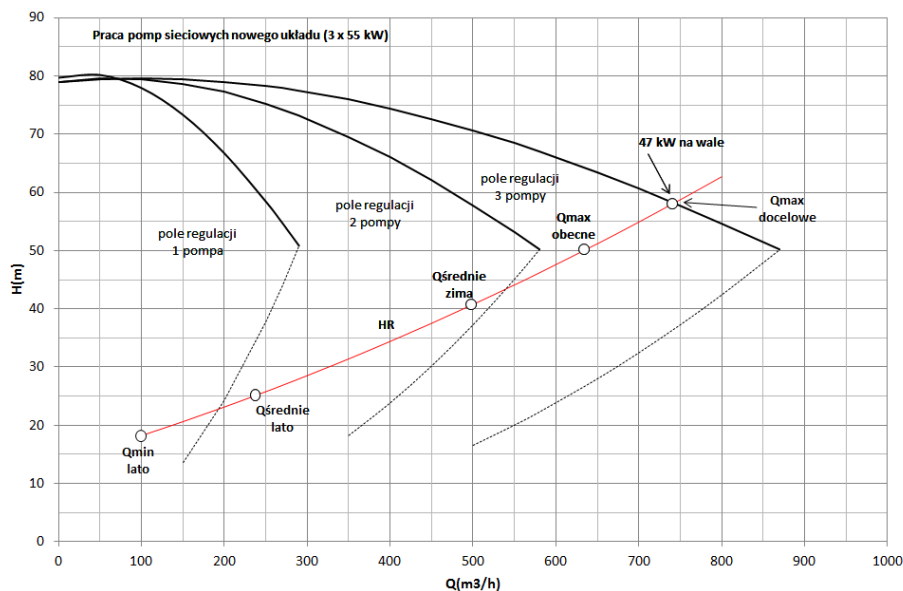
Układ został zmodernizowany do postaci technologicznej pokazanej na Rysunku 2. W nowym układzie:

- zainstalowano pompy przevalowe kotłów w zabudowie gniazdowej,
- zmieniono i ujednolicono hydraulicznie pompy obiegowe,
- wyeliminowano gniazdo pomp zmieszania gorącego,
- rozdławiono węzeł zmieszania zimnego,
- wszystkie pompy zostały wyposażone w przemienniki częstotliwości.

Wszystkie pompy, zarówno obiegowe jak i przevalowe, zostały pod względem energetycznym dopasowane do



Rysunek 3. Charakterystyki pomp obiegowych WILO-Atmos GIGA-N 80/200-55/2



Rysunek 4. Pole pracy pomp obiegowych

wymagań. W ten sposób **uniknięto niepotrzebnych nadwyżek regulacyjnych**. Zastosowano pompy o zdecydowanie wyższej sprawności oraz o płaskim przebiegu pagórka sprawności. Charakterystykę pompy obiegowej pokazuje Rysunek 3.

Wysoka sprawność nominalna (86%) oraz płaski pagórek w szerokim zakresie zmian przepływów spowodował znaczne zwiększenie efektywności pompowania. Niezależnie od wymaganego przepływu, pompa/pompy pracują w zakresie swoich sprawności optymalnych. Praca układu pomp obiegowych została pokazana na Rysunku 4.

Wobec jednakowych charakterystyk przepływu pomp obiegowych, przy regulacji synchronicznej został zapewniony wyrównany poziom obciążeń oraz praca wszystkich jednostek z taką samą sprawnością własną. W celu pokonania oporów kotłów wykorzystano pompy przewałowe (Rysunek 5) o **sprawności nominalnej 83%** i o tak dobranych parametrach, żeby było możliwe zasilanie każdego kotła. Zrezygnowano z zabudowy indywidualnej na rzecz zabudowy gniazdowej, ze względu na niższe koszty oraz

lepsze rezerwowanie.

Pompy przewałowe również mają płaskie przebiegi sprawności, co jest istotne przy pracy kotłów w zakresie zmiennych obciążeń. W pompach przewidziano pewną nadwyżkę parametrową (Rysunek 6) do wykorzystania w sytuacjach ruchowo koniecznych (np. przy konieczności zapewnienia wymaganego ciśnienia blokady przy pracy kotłów z ich maksymalną temperaturą wylotową).

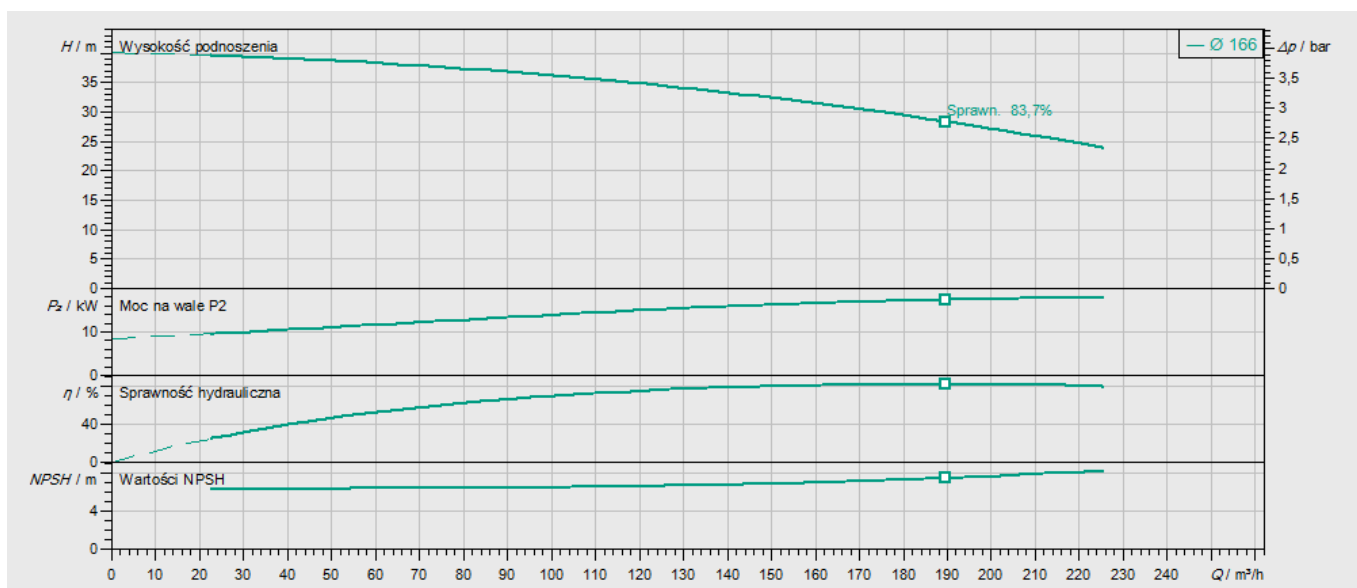
Tak zmieniona konfiguracja oraz dopasowanie parametrowe pomp spowodowały **zmniejszenie mocy zainstalowanej w pompach z 465 kW do 294 kW, czyli o ponad 35%**. Lepsze dopasowanie pomp do wymagań, wyższa sprawność oraz likwidacja strat dławienia na zmieszaniu zimnym, przyniosły znaczące sumaryczne efekty energetyczne.

Zasilanie, sterowanie i regulacja

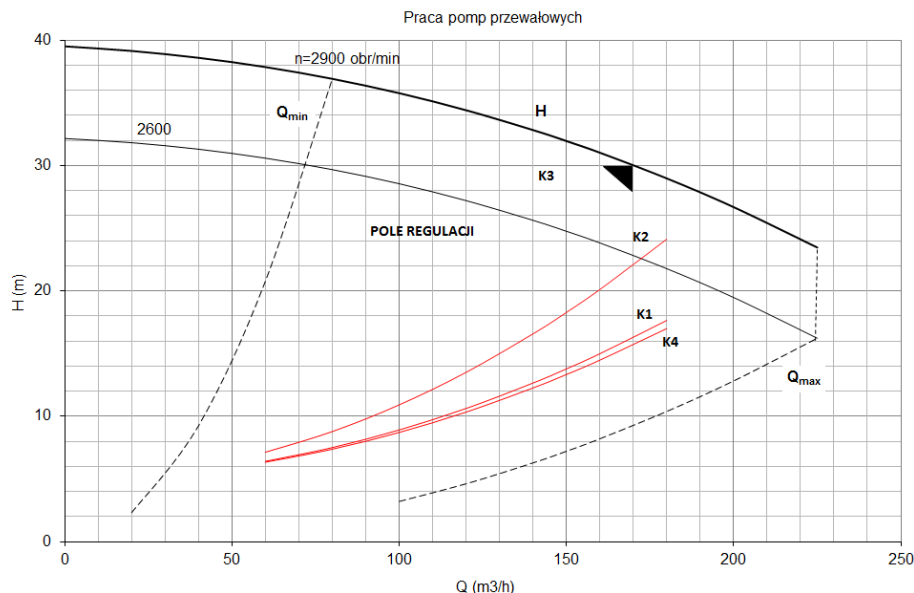
W celu zasilenia nowych silników pomp obiegowych i przewałowych zdecydowano o wymianie wyeksploatowanych rozdzielnic elektrycznych na rzecz aktualnie stosowanych rozwiązań technicznych. Zaprojektowano nowy układ rozdziału energii elektrycznej oraz nowe szafy, w których umieszczono przemienniki częstotliwości zasilające silniki pomp. Poprawiono w ten sposób funkcjonalność układu, bezpieczeństwo obsługi, zapewniając komfort eksploatacyjny całego układu.

Nowe rozdzielnice elektryczne oraz szafy z przemiennikami umieszczono w pompowni, w bezpośrednim sąsiedztwie stanowisk pompowych, zapewniając im właściwe warunki chłodzenia.

Wszystkie, wymagane przez technologię pracy Ciepłowni układy sterowania, regulacji i blokad umieszczono w nowym sterowniku części ciepłowniczej. Zaprojektowane sygnały pomiarowe z przetworników i czujników



Rysunek 5. Charakterystyki pomp przewałowych WILO-Atmos GIGA-B 80/140-18,5/2 18,5/2



Rysunek 6. Pole pracy pomp przewalowych

objektowych wprowadzono do sterownika. Z sterownika wyprowadzono sygnały sterujące układami wykonawczymi na obiekcie, komunikaty o przekroczeniach oraz sygnalizacje statusu i awarii urządzeń.

W procesie sterowania pośredniczy szafa automatyki, na której umieszczono aparaty sterujące sygnalizacyjne oraz wskaźniki pomiaru wielkości fizycznych. Ponadto szafę automatyki wyposażono w panel operatorski umożliwiający pełną kontrolę nad wszystkimi układami technologicznymi części ciepłowniczej oraz kolumnę sygnalizacyjną do komunikowania zdarzeń obiektowych Operatorowi.

Dodatkowo, do systemu komputerowego wprowadzono łączem LAN informacje o parametrach elektrycznych z wszystkich zamontowanych przemienników.

Zmieniona technologia pracy Ciepłowni wymagała wprowadzenia nowych układów automatycznej regulacji,

takich jak:

- regulacja ciśnienia dyspozycyjnego wody do sieci miejskiej,
- regulacja przepływu wody przez kotły wodne,
- regulacja temperatury wody na wlocie do kotłów wodnych.

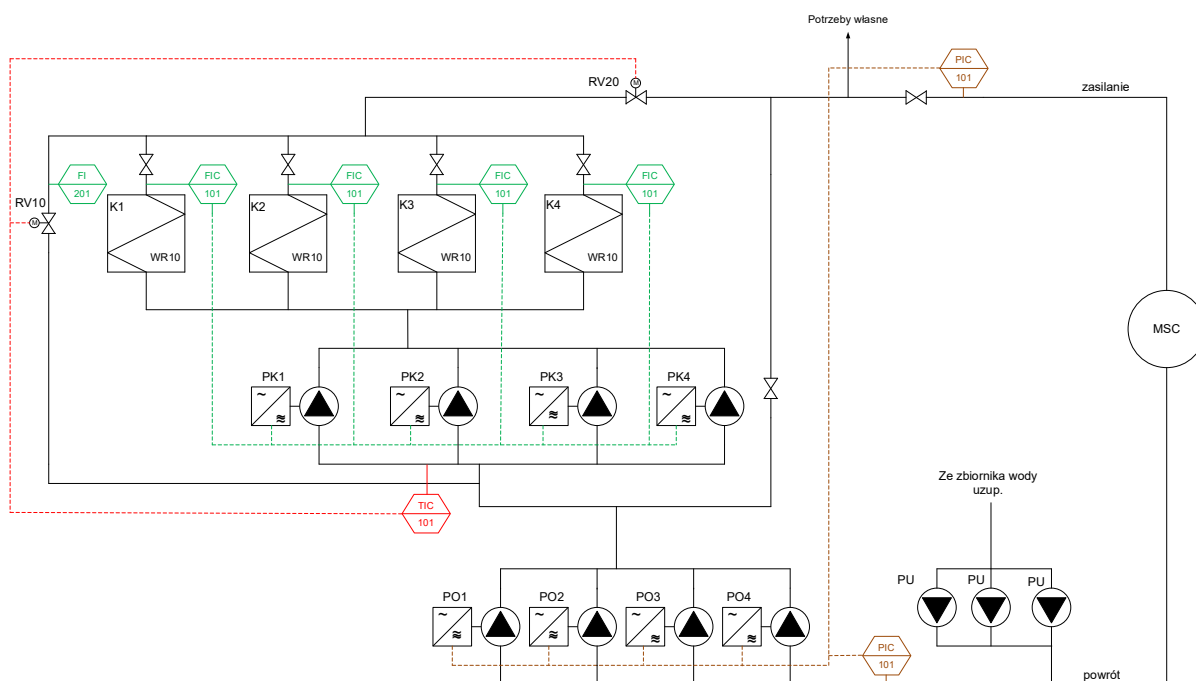
Wszystkie układy regulacji (Rysunek 7) zrealizowano w nowym sterowniku części ciepłowniczej. Wizualizację pracy układów umieszczono w stacji operatorskiej i na panelu operatorskim. Będące w ruchu pompy są sterowane tym samym sygnałem sterującym – pracują z taką samą prędkością obrotową.

Regulacja ciśnienia dyspozycyjnego (PIC 101) do sieci miejskiej sprowadza się do utrzymania

zadanej wartości różnicy ciśnienia zasilania i powrotu. Układ automatycznej regulacji dostosowuje parametry pomp obiegowych do wymaganego w danej chwili ciśnienia w sieci miejskiej.

Regulacja przepływu przez kotły wodne (FIC 101) zapewnia stałość zadanego przez Operatora przepływu w tych urządzeniach. Elementami wykonawczymi układu są pompy przewalowe z napędami o zmiennej prędkości obrotowej, a sygnałem regulacji jest przepływ przez pracujący kocioł o największym oporze hydraulicznym.

Regulacja temperatury wody przed kotłami wodnymi (TIC 101) pozwala na uzyskanie stałej temperatury wody na wlocie do kotłów dla zapewnienia prawidłowej eksploatacji kotłów. Proces regulacji temperatury wody mieszanina gorących kotłów prowadzony jest przez przepustnice regulacyjne wyposażone w napędy elektryczne.



Rysunek 7. Schemat regulacji układu technologicznego i pompowego Ciepłowni Malbork

Wykonanie

Prace obiektowe (Fotografia 1) wykonane były podczas ruchu Ciepłowni. Nowe układy pompowe zostały wbudowane w starą technologię. Stanowiło to wyzwanie podczas wszystkich prac montażowych ze względu na ograniczoną ilość miejsca, natomiast gwarantowało ciągłą dostawę ciepła do odbiorców, co było priorytetem dla władz ECO Malbork. Stary układ został zdemontowany dopiero po uruchomieniu nowego i uzyskaniu sprawności parametrowej układu pompowego oraz sieci ciepłowniczej.

Jako pompy sieciowe (obiegowe) zostały zabudowane cztery zespoły pompowe, normowe WILO-Atmos GIGA-N 80/200-55/2 (Fotografia 3) pracujące w układzie kolektorowym.

Jako pompy kotłowe zastosowano blokowe pompy WILO-Atmos GIGA-B 80/140-18,5/2 (Fotografia 2). Blokowa konstrukcja charakteryzuje się zwartą budową pozwalającą na oszczędność miejsca w maszynowni.

Wszystkie jednostki pompowe zostały posadowione na stalowych ramach z wibroizolatorami, które znacznie ułatwiły i przyspieszyły montaż oraz serwisowanie pomp, szczególnie tych o konstrukcji blokowej.

Podczas prac obiektowych wyzwanie stanowiła również wymiana starej infrastruktury elektrycznej. Nowe szafy zasilające i sterujące przewidziane były w miejscu starych jednostek, w związku z tym należało wykonać zasilanie rezerwowe dla wciąż pracujących starych układów pompowych, zapewniających sprawność ruchową obiektu.

Gdy nowe układy hydrauliczne, elektryczne i sterowania były zmontowane i przeszły testy funkcjonalne, przystąpiono do przełączenia układów. Przeróbki ciepłowni trwał kilka godzin, podczas którego nowe instalacje zostały podłączone do infrastruktury obiektu i nastąpiło ponowne uruchomienie Ciepłowni. Następnie zdemontowano stary układ technologiczny.

Efekty energetyczne

W trakcie prac koncepcyjnych szacowano uzyskanie efektu energetycznego poprzez redukcję zużycia energii elektrycznej o ok. 30%. W warunkach eksploatacyjnych uzyskano redukcję zużycia energii elektrycznej **od 31,9% do 43%** w zależności od roku odniesienia (Tabela 1).

Podsumowanie

Modernizacja ciepłowni, zaprojektowanych i wybudowanych w latach 70–90-tych ubiegłego stulecia, w oparciu o trzy główne zasady:

- zmianę technologii pompownia,
- zastosowanie pomp o wysokich sprawnościach z płaskim przebiegiem charakterystyki sprawności,



Fotografia 1. Prace montażowe pomp sieciowych Wilo Atmos GIGA-N



Fotografia 2. Pompy kotłowe K1- K4 WILO-Atmos GIGA-B 80/140-18,5/2



Fotografia 3. Pompy obiegowe P01 – P04 WILO-Atmos GIGA-N 80/200-55/2

Tabela 1. Efekt energetyczny - porównanie do lat 2020–2023

Zużycie energii elektrycznej na pompowanie w latach 2020–2024 w Ciepłowni Miejskiej przy ul. Piaskowej 1 w Malborku (w związku z modernizacją układu pompowego w 2023 r.)													
Parametr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	SUMA [kWh]
2020													
Całość	207801	185992	183859	144061	116612	50032	38214	36503	55031	137095	164021	203907	1523128
Pompowanie	141460	124820	132070	104080	85720	35810	26190	24340	37760	98770	114230	130640	1055890
Przepływ [m³/h]	548	514	487	406	332	177	129	126	194	414	503	559	362
Wskaźnik transportu [kWh/m³]	0,347	0,362	0,364	0,356	0,347	0,281	0,274	0,259	0,270	0,320	0,316	0,314	0,333
2021													
Całość	218075	200227	184632	141070	100300	47952	50775	54589	74513	140367	181558	234835	1628892
Pompowanie	133550	117760	117670	102680	74040	33200	38050	42450	55580	97850	118610	140930	1072370
Przepływ [m³/h]	585	553	496	452	326	224	238	247	296	435	510	562	407
Wskaźnik transportu [kWh/m³]	0,307	0,317	0,319	0,316	0,305	0,206	0,215	0,231	0,261	0,302	0,323	0,337	0,301
2022													
Całość	229391	197400	191384	175349	116130	47016	43346	41271	75642	115513	161697	208431	1602770
Pompowanie	137290	120650	121810	111320	74250	41130	33040	29220	47750	73560	90180	115110	995310
Przepływ [m³/h]	555	543	493	455	310	239	182	162	254	356	455	514	372
Wskaźnik transportu [kWh/m³]	0,332	0,330	0,332	0,340	0,322	0,239	0,244	0,242	0,261	0,277	0,276	0,301	0,305
2023													
Całość	201425	179779	183096	135221	67131	32474	27446	29751	27383	80685	143434	180805	1288631
Pompowanie	125110	120650	115270	95850	54970	31000	26790	26450	26000	70000	80000	67408	839498
Przepływ [m³/h]	502	506	461	396	267	224	195	183	172	366	463	488	349
Wskaźnik transportu [kWh/m³]	0,335	0,355	0,336	0,336	0,277	0,192	0,184	0,194	0,210	0,257	0,240	0,186	0,275
2024													
Całość	189648	148829	144867	102409	40353	20940	16878	18443	19728	94156	140904	157795	1094949
Pompowanie	92154	70866	69902	56438	29503	18075	13540	14091	13149	48191	63023	70245	559177
Przepływ [m³/h]	510	464	432	384	260	196	177	195	186	373	463	470	339
Wskaźnik transportu [kWh/m³]	0,243	0,227	0,217	0,204	0,152	0,128	0,103	0,097	0,098	0,174	0,189	0,201	0,188
Procentowe zmniejszenie wskaźnika zużycia energii elektrycznej zużytej na pompowanie w roku 2024 w stosunku do lat ubiegłych [kWh/GJ]													
W stosunku do roku 2020							43,0%						
W stosunku do roku 2021							37,3%						
W stosunku do roku 2022							39,8%						
W stosunku do roku 2023							31,9%						
Dane z koncepcji z września 2022 r. Wskaźnik kosztu transporty wody sieciowej - porównanie													
					Okres			Grzewczy			Letni		
					Q (m³/h)			500			240		
Stan obecny					K (kWh/m³)			0,322			0,267		
Stan po modernizacji					K (kWh/m³)			0,212			0,108		

— zastosowanie odpowiednich urządzeń i algorytmów sterowania układami pompowymi, daje bardzo dobre wyniki w zakresie poprawy efektywności energetycznej procesu pompowania, nawet przewyższające założenia koncepcyjne i projektowe. Nie bez znaczenia jest również opracowany i wdrożony nowy standard eksploatacji obiektu, co wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo i dyspozycyjność eksploatacyjną źródła.

Autorzy niniejszego artykułu, będący jednocześnie odpowiedzialni za przygotowanie koncepcji, projektów wykonawczych oraz realizację opisaną w artykule modernizacji, składają gorące podziękowania Władzom ECO Malbork, w szczególności Panu Prezesowi Janowi Hałuszczakowi, za okazane zaufanie, współpracę podczas realizacji zadania oraz za podzielenie się danymi pozwalającymi ocenić finalny efekt energetyczny i ekonomiczny modernizacji. Przeprowadzona, udana modernizacja nie byłaby możliwa bez ścisłej współpracy technicznej ze służbami obiektu, szczególnie z szefem ciepłowni Panem Bolesławem Czerwińskim oraz Pawłem Wójcikiem i Robertem Otta.

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 parcjale¹ 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.

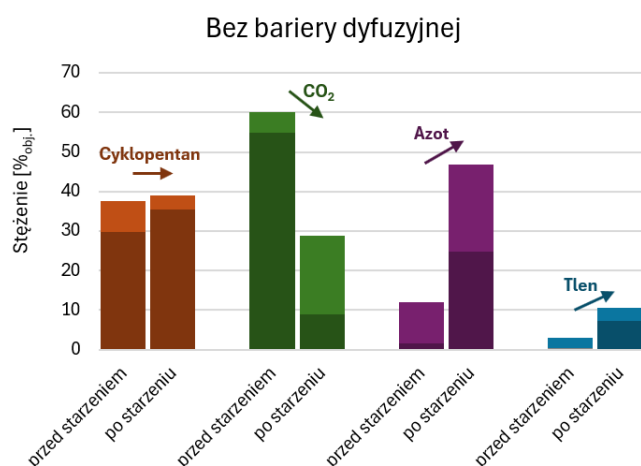
Cienka warstwa EVOH jest wbudowana w ściankę rury osłonowej w trakcie jej wytłaczania. Jest to konieczne z dwóch względów:

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.

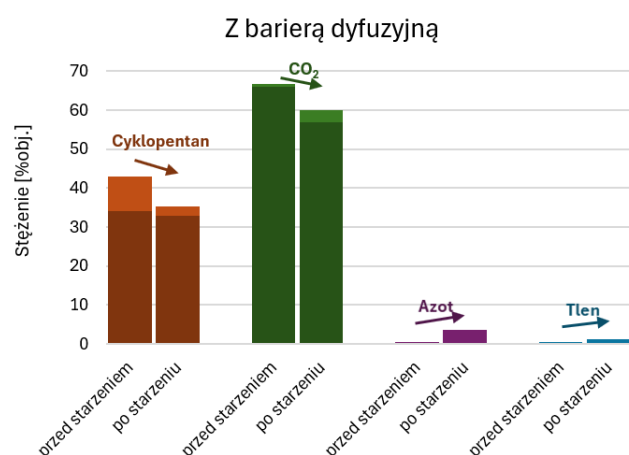
¹ ciśnienie cząstkowe, ciśnienie parcjale – ciśnienie, jakie wywierałby dany składnik mieszaniny gazów, gdyby w tej samej temperaturze sam zajmował objętość całej mieszaniny

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

Ciepło z polskiej elektrowni jądrowej

Zbigniew Borkowski¹

Agnieszka Kęska-Korczyńska²

Petr Průka³

¹ Członek Rady Okręgu Północnego IGCP

Prezes Zarządu Infracorr

² Dyrektor Sprzedaży Regionu North-East LOGSTOR Kingspan

³ Koordynator projektu po stronie inwestora i operatora Elektrowni Jądrowej Temelín, ČEZ



LOGSTOR

Szczegółowy wywiad opublikowany w numerze 1/2024 czasopisma „All for Power”.

Polska energetyka wchodzi w nowy etap. Budowa pierwszej elektrowni jądrowej na Pomorzu może oznaczać nie tylko stabilne źródło bezemisyjnej energii elektrycznej, lecz także początek nowego podejścia do produkcji i przesyłu ciepła systemowego.

Transformacja energetyczna zmienia sposób, w jaki patrzymy na źródła energii. W centrum uwagi pozostaje oczywiście rozwój odnawialnych źródeł energii, elektryfikacja gospodarki i poprawa efektywności energetycznej. Coraz większe znaczenie ma jednak również maksymalne wykorzystanie energii już dostępnej w systemie w tym nadmienionego ciepła, które w tradycyjnym układzie pozostaje niewykorzystane.

To właśnie w tym kontekście warto spojrzeć szerzej na projekt pierwszej polskiej elektrowni jądrowej w lokalizacji Lubiatowo–Kopalino. Polskie Elektrownie Jądrowe realizują przedsięwzięcie oparte na trzech reaktorach AP1000 firmy Westinghouse. 31 marca 2026 roku PEJ złożyły do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki wnio-

sek o wydanie zezwolenia na budowę elektrowni, jeden z kluczowych etapów poprzedzających rozpoczęcie prac budowlanych. Warto już dziś postawić pytanie, czy pierwsza polska elektrownia jądrowa powinna być postrzegana wyłącznie jako źródło energii elektrycznej, czy też jako element przyszłego, zintegrowanego systemu energetycznego regionu.

Od produkcji energii do wykorzystania całego potencjału

Współczesne ciepłownictwo stoi przed podwójnym wyzwaniem: musi ograniczać emisję, a jednocześnie zapewniać odbiorcom stabilne i przewidywalne dostawy energii oraz **możliwie najniższe ceny ciepła i ich stabilność w długim okresie**. Wymaga to dywersyfikacji źródeł oraz możliwie efektywnego wykorzystania energii pierwotnej.

Kierunek ten znajduje potwierdzenie również w unijnych regulacjach. Dyrektywa 2023/1791 w sprawie efektywności energetycznej wskazuje na potrzebę rozwoju efektywnych systemów ciepłowniczych, zwiększania udziału energii odnawialnej oraz ciepła odpadowego, a tak-

że przeprowadzania analiz kosztów i korzyści dla możliwości wykorzystania ciepła pochodzącego z instalacji wytwarzających energię elektryczną. Dokument wyraźnie wskazuje również, że dostępne ciepło może być transportowane tam, gdzie jest potrzebne, za pośrednictwem sieci ciepłowniczych. Zmiana w sposobie myślenia o systemach energetycznych. Nie chodzi już wyłącznie o to, aby znaleźć nowe źródło



energii. Chodzi o to, aby wykorzystać możliwie dużą część energii, która już znajduje się w procesie technologicznym.

W przypadku elektrowni jądrowej otwiera to możliwość wykorzystania części energii cieplnej do celów komunalnych i przemysłowych. Takie podejście może zwiększać ogólną efektywność wykorzystania paliwa jądrowego, a jednocześnie wspierać dekarbonizację lokalnych systemów ciepłowniczych.



Czechy pokazują, że to działa

Jednym z najlepszych przykładów praktycznego wykorzystania potencjału ciepła z elektrowni jądrowej są Czechy.

We wrześniu 2023 roku zakończono budowę magistrali łączącej Elektrownię Jądrową Temelín z Czeskimi Budziejowicami. Rurociąg o długości 26 km dostarcza do miasta ciepło z elektrowni jądrowej, zastępując część produkcji ciepłowni opartej wcześniej w dużej mierze na węglu. Według ČEZ roczna dostawa wynosi około 750 TJ i odpowiada mniej więcej jednej trzeciej zapotrzebowania ciepłego miasta. Nie jest to jedynie projekt demonstracyjny. W 2025 roku Temelín dostarczył do Czeskich Budziejowic 729 TJ bezemisijnego ciepła (co odpowiada sprzedaży ciepła takich PECów jak Legionowo, Przemyśl, Chrzanów czy Veolia Wielkopolska dostarczająca ciepło do 34 miast i miasteczek). System pracuje więc jako rzeczywista część miejskiego systemu ciepłowniczego, a nie jako rozwiązanie pozostające na etapie koncepcji. Przedsięwzięcie pokazuje także, że przesył ciepła na znaczne odległości może być rozwiązaniem praktycznym. W projekcie ujęto rozwiązanie dwóch rurociągów prowadzonych na dystansie 26 km, a zastosowana technologia oraz odpowiednie układy pompowe pozwoliły stworzyć stabilne połączenie pomiędzy źródłem, a systemem ciepłowniczym miasta. Doświadczenia czeskie są szczególnie interesujące dla Polski jeszcze z jednego powodu. W regionie południowoczeskim wykorzystanie potencjału energetyki jądrowej w ciepłownictwie jest traktowane jako element długofalowej transformacji. Równolegle analizowane są kolejne projekty, w tym wykorzystanie ciepła z elektrowni Dukovany dla Brna położonego w odległości ok. 50 km.

Pomorze ma własną szansę

Podobne rozwiązanie można analizować także dla Pomorza. Z przygotowanych analiz wynika, że ciepło z planowanej elektrowni w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino mogłoby potencjalnie zostać przesyłane do odbiorców regionalnych, w tym do Gdyni i Gdańska.

Wstępne analizy Instytutu Maszyn Przepływowych PAN wskazują na możliwość rozpatrywania magistrali o długości około 65 km do Gdyni oraz około 95 km do Gdańska. W analizowanym wariantcie zakładano temperaturę zasi-

łania na poziomie około 90°C, spadek temperatury rzędu około 4 K oraz straty przesyłowe wynoszące kilka procent. Szacowane zapotrzebowanie cieplne Pomorskiej Metropolii określono na około 1–1,5 GW. Autorzy opracowania podkreślają jednocześnie, że nie jest to jeszcze pełne studium wykonalności, lecz analiza inżynierska wskazująca na realne podstawy techniczne dalszych prac.

Dystans nie powinien więc być automatycznie traktowany jako bariera. W przypadku odpowiednio zaprojektowanego systemu, wykorzystującego wysokiej jakości rury preizolowane, nowoczesne przepompownie, automatykę oraz monitoring parametrów pracy, możliwe jest ograniczenie strat przesyłu i zapewnienie odpowiedniej niezawodności całej magistrali.

Czeski przykład jest tutaj szczególnie cenny, ponieważ pokazuje, że o sukcesie projektu decyduje nie jeden element, lecz cały system: właściwie zaprojektowane źródło ciepła, stacje wymienników, pompy, automatyka, sposób prowadzenia trasy oraz przede wszystkim odpowiednio dobrana technologia rurociągową. W magistrali Temelín-České Budějovice zastosowano rury preizolowane DN 500, trzy przepompownie (ze względu na ukształtowanie terenu) oraz rozbudowany system armatury i diagnostyki. Maksymalna moc przesyłana magistralą wynosi 100 MW, a straty ciepła dla rurociągu nie przekraczają 5%.

Rury preizolowane jako infrastruktura, która decyduje o efektywności

W projektach tego typu infrastruktura przesyłowa przestaje być wyłącznie elementem wykonawczym. Staje się jednym z kluczowych czynników decydujących o efektywności całego rozwiązania.

Wielokilometrowe magistrale ciepłownicze muszą zapewniać jednocześnie niskie straty ciepła, trwałość, bezpieczeństwo eksploatacyjne oraz możliwość precyzyjnej kontroli parametrów pracy. Dlatego szczególne znaczenie mają współczesne systemy rur preizolowanych, które mogą być stosowane zarówno w rozwiązaniach podziemnych, jak i na bardziej wymagających odcinkach naziemnych czy estakadach.

Czeska realizacja dobrze pokazuje, że przy odpowiednim przygotowaniu technicznym możliwe jest prowadze-

nie magistrali przez tereny o zróżnicowanych warunkach gruntowych, pod drogami i w sąsiedztwie istniejącej infrastruktury. W projekcie Temelín–České Budějovice zastosowano 26 km rurociągu DN 500, siedem estakad oraz liczne komory armaturowe i przepompownie.

Także w Polsce technologia jest dostępna. W przypadku potencjalnej magistrali łączącej elektrownię jądrową z systemem ciepłowniczym Pomorza zasadniczym wyzwaniem nie wydaje się być dziś dostępność technologii, lecz właściwe przygotowanie projektu od studium wykonalności i modelu hydraulicznego, przez trasowanie i analizę kosztów, aż po dobór materiałów, automatykę i model eksploatacyjny.

Najważniejsza decyzja oparta na faktach

Najważniejsza lekcja z doświadczeń czeskich nie dotyczy jednak wyłącznie parametrów technicznych. Dotyczy momentu, w którym należy zacząć projektować system.

W Temelínie możliwość wykorzystania ciepła była przewidziana już na etapie koncepcji elektrowni. Idea nie pojawiła się dopiero wtedy, gdy wszystkie zasadnicze decyzje projektowe zostały zamknięte. Kolejne lata przeznaczono na przygotowanie dokumentacji, ocenę środowiskową, decyzje lokalizacyjne, wybór trasy oraz przygotowanie kontraktów.

To doświadczenie powinno być dla Polski ważną wskazówką.

Projekt pierwszej elektrowni jądrowej jest inwestycją wielopokoleniową. Jeżeli dziś mówimy o transformacji energetycznej, efektywności energetycznej i budowie nowoczesnych, niskoemisyjnych systemów ciepłowniczych, warto już na etapie przygotowania inwestycji przeanalizować wszystkie możliwości wykorzystania energii z przyszłego źródła.

Nie oznacza to, że magistrala z Lubiatowo–Kopalino do Pomorskiej Metropolii jest dziś gotowym projektem. Oznacza natomiast, że istnieją wystarczające przesłanki, aby takie rozwiązanie poddać kompleksowej analizie tech-

nicznej, ekonomicznej, środowiskowej i organizacyjnej.

W tym ujęciu pierwsza polska elektrownia jądrowa może stać się czymś więcej niż tylko nowym źródłem energii elektrycznej. Może być jednym z filarów regionalnego systemu energetycznego, w którym energia elektryczna i ciepło są traktowane jako dwa elementy tego samego procesu.

Czas wykorzystać doświadczenia sąsiadów

Polska nie musi budować takiego rozwiązania od podstaw. Czechy pokazały, że przesył ciepła z elektrowni jądrowej do odległego miasta może funkcjonować w realnych warunkach eksploatacyjnych. Ich doświadczenia obejmują nie tylko samą budowę magistrali, lecz także zarządzanie systemem, regulację temperatury i przepływu, współpracę operatorów oraz utrzymanie infrastruktury.

Dla Polski jest to wyjątkowo cenna wiedza – zwłaszcza teraz, kiedy projekt pierwszej elektrowni jądrowej przechodzi do kolejnych etapów przygotowania.

Efektywna transformacja energetyczna nie polega bowiem wyłącznie na zastępowaniu jednego źródła drugim. Polega również na tym, **aby z nowych źródeł energii wykorzystać możliwie pełny potencjał.**

Właśnie dlatego warto już dziś potraktować ciepło z pierwszej polskiej elektrowni jądrowej jako element przyszłej architektury polskiego ciepłownictwa. Doświadczenia Temelína pokazują, że taki kierunek jest technicznie możliwy i może przynosić wymierne korzyści środowiskowe oraz systemowe. **Unijna polityka efektywności energetycznej dodatkowo wzmacnia znaczenie odzysku ciepła i rozwoju efektywnych sieci ciepłowniczych.** Technologia jest dostępna. Doświadczenia są już zebrane. Potrzebna jest przede wszystkim decyzja, aby potencjał ten przeanalizować i wykorzystać.

Bo w przypadku infrastruktury tej skali najdroższe nie musi być to, co zostanie zbudowane. Najdroższe może okazać się to, czego nie zaplanowano wtedy, gdy było to jeszcze możliwe.



Kontrola okresowa przewodów kominowych



Andrzej Falkowski

Przewodniczący Głównej Komisji Legislacyjnej
Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

W ramach dzisiejszego artykułu chciałbym wrócić do tematu kontroli okresowych przewodów kominowych (dymowych, spalinowych i wentylacyjnych), a przy okazji zasygnalizować istnienie cyklu publikowanego przez Główny Urząd Nadzoru Budowlanego pn. „Ciekawe interpretacje GUNB”.

Pytanie jakie otrzymaliśmy od jednego z czytelników dotyczyło obowiązku przeprowadzania kontroli okresowej typowej instalacji wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej w kontekście jednej z interpretacji GUNB – a mianowicie czy kontrola ta powinna być prowadzona na podstawie art. 62 ust. 1 pkt 1 lit. c Prawa budowlanego, który dotyczy kontroli okresowych przewodów kominowych (dymowych, spalinowych i wentylacyjnych).

Na wstępie warto wspomnieć, że Prawo budowlane nie rozpieszcza czytelników. Liczne nowelizacje, odesłania do rozporządzeń oraz nie zawsze konsekwentna terminologia sprawiają, że nawet doświadczeni projektanci mogą dochodzić do odmiennych wniosków. Dlatego co do zasady warto śledzić publikowany przez Główny Urząd Nadzoru Budowlanego cykl „Ciekawe interpretacje GUNB”. Opracowania odnoszą się do konkretnych problemów i często pozwalają uniknąć niepotrzebnego formalizmu.

Trzeba jednak niestety też pamiętać, że pozostają one poglądem tego urzędu. Nie są źródłem prawa ani gwarancją, że taki sam pogląd podzieli organ prowadzący konkretną sprawę lub sąd administracyjny. Warto więc treść tych interpretacji poddawać własnej ocenie, w oparciu o posiadaną wiedzę zarówno zawodową jak i znajomości treści przepisów. W efekcie nie każdą publikację z cyklu można przyjąć bez zastrzeżeń.

Takim przykładem jest interpretacja z 1 kwietnia 2025 r., w której GUNB uznał, że coroczna kontrola wykonywana na podstawie art. 62 ust. 1 pkt 1 lit. c Prawa budowlanego „...dotyczy wszystkich przewodów kominowych wentylacyjnych – grawitacyjnych i mechanicznych...” <https://www.gov.pl/web/gunb/ciekawe-interpretacje-gunb--kontrola-okresowa-przewodow-kominowych>. Według Urzędu potwierdza to m.in. art. 62 ust. 6 pkt 2, który powierza osobom z odpowiednimi uprawnieniami budowlanymi kontrole kominów lub przewodów kominowych, w których ciąg kominowy jest wymuszony pracą urządzeń mechanicznych. Konsekwencją ma być również sporządzanie protokołu w systemie CEEB. Taki wniosek – jeśli należy go rozumieć jako obowiązek objęcia kontrolą w ramach tego

przepisu również instalacje wentylacji mechanicznej – budzi poważne wątpliwości.

Należy zauważyć, że art. 62 ust. 6 Prawa budowlanego dzieli przewody kominowe na dwie grupy wskazując, kto jest uprawniony do kontroli każdej z nich:

„6. Kontrolę stanu technicznego przewodów kominowych, o której mowa w ust. 1 pkt 1 lit. c, powinny przeprowadzać:

1) osoby posiadające kwalifikacje mistrza w rzemiośle kominarskim - w odniesieniu do przewodów dymowych oraz **grawitacyjnych** przewodów spalinowych i **wentylacyjnych**;

2) osoby posiadające uprawnienia budowlane odpowiedniej specjalności - w odniesieniu do przewodów kominowych, o których mowa w pkt 1, oraz do kominów przemysłowych, kominów wolno stojących oraz kominów lub przewodów **kominowych**, w których **ciąg kominowy jest wymuszony pracą urządzeń mechanicznych**.”

W kontekście wentylacji sformułowanie zawarte w art. 62 ust. 6 pkt 1 wyraźnie wskazuje wyłącznie na przewody grawitacyjne. Zresztą, gdyby przyjąć na chwilę inaczej, czyli sformułowanie „grawitacyjnych” odnieść wyłącznie do przewodów spalinowych (z pominięciem wentylacyjnych), to w konsekwencji musielibyśmy przyjąć absurdalny wniosek, że do kontroli wentylacji mechanicznej uprawnienia posiada kominarz. Podsumowując - wentylacja mechaniczna jest więc z tego przepisu wyłączona. Z kolei treść art. 62 ust. 6 pkt 2 w kontekście urządzeń mechanicznych można racjonalnie odnieść tylko do przewodów kominowych, a więc również nie do wentylacji mechanicznej.

Nie oznacza to oczywiście, że instalacji wentylacji mechanicznej nie trzeba kontrolować i utrzymywać. Obowiązki te mogą wynikać z art. 61 Prawa budowlanego, obowiązku kontroli instalacji narażonych na szkodliwe wpływy atmosferyczne i niszczące działania czynników występujących podczas użytkowania obiektu, przepisów szczególnych, dokumentacji techniczno-ruchowej, zaleceń producenta i zasad wiedzy technicznej. Problem dotyczy jednak czegoś węższego: czy instalacja wentylacji mechanicznej podlega corocznej kontroli „kominowej” oraz w konsekwencji czy jej protokół musi powstać w CEEB. Moim zdaniem obecne brzmienie przepisów nie daje podstawy do tak daleko idącego wniosku.

Pomimo powyższego zastrzeżenia cykl prowadzony

przez GUNB zdecydowanie warto czytać. Pokazuje problemy uczestników procesu budowlanego i często podsuwa rozsądne rozwiązania. Najlepiej traktować go jednak jak komentarz ważnego urzędu, ale nie jak kolejną część Dziennika Ustaw.

Korzystając więc z okazji wskazałbym inne ciekawe interpretacje GUNB, które w pełni podziela i dość często jako „sanitarnicy” mamy z nimi do czynienia. Dobrym przykładem takiej interpretacji jest stanowisko dotyczące **budowy przyłączy przy obiektach wpisanych do rejestru zabytków lub na obszarach wpisanych do tego rejestru** <https://www.gov.pl/web/gunb/cykl-ciekawe-interpretacje-gunb--budowa-przylaczy-przy-zabytkach-bez-pozwolenia-na-budowe-i-zgloszenia>. GUNB wskazuje, że inwestor może skorzystać z art. 29a Prawa budowlanego i wykonać przyłącze **bez pozwolenia na budowę oraz bez zgłoszenia**. Artykuł 29 ust. 7, zaostreżający tryb robót przy zabytkach, odwołuje się bowiem do robót wymienionych w art. 29 ust. 1–4, natomiast art. 29a stanowi samodzielną podstawę realizacji przyłączy. Nie oznacza to zwolnienia z wymagań ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami. Formalności budowlane i ochrona konserwatorska są tu dwiema odrębnymi warstwami regulacji – brak obowiązku uzyskania pozwolenia na budowę bądź zgłoszenia do organu administracji architektoniczno-budowlanej nie daje inwestorowi zwolnienia uzyskania pozwo-

lenia konserwatora, jeśli dana inwestycja podlega takiemu obowiązkowi.

Trafne jest też wyjaśnienie dotyczące e-CRUB. Jeżeli osoba i jej uprawnienia budowlane są ujawnione w centralnym rejestrze, organ powinien w pierwszej kolejności sprawdzić uprawnienia oraz przynależność do izby właśnie w tym systemie: <https://www.gov.pl/web/gunb/cykl-ciekawe-interpretacje-gunb--e-crub-a-dokumenty-papierowe>. Co do zasady nie może wtedy żądać papierowej kopii decyzji o nadaniu uprawnień ani aktualnego zaświadczenia z izby. Wyjątkiem jest brak danych w e-CRUB albo awaria systemu. To ważna wskazówka dla projektantów nadal spotykających się z urzędowym odruchem: „proszę dołączyć skan dokumentu, który sami możemy sprawdzić”.

Warto też przypomnieć stanowisko GUNB dotyczące **załączników do projektu budowlanego** <https://www.gov.pl/web/gunb/cykl-ciekawe-interpretacje3>. Urząd rozróżnił dokumenty przypisane do poszczególnych opracowań projektowych od „załączników projektu budowlanego” w rozumieniu § 5 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego. Do tej drugiej, zamkniętej grupy należą wymagane przepisami ustaw opinie, uzgodnienia i pozwolenia, czy informacja BIOZ. Interpretacja ta pomaga uporządkować nieprecyzyjną terminologię ustawy i rozporządzenia.



Rok założenia 1919

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH ODDZIAŁ W KRAKOWIE POLISH ASSOCIATION OF SANITARY ENGINEERS AND TECHNICIANS

zaprasza na

XIX OGÓLNOPOLSKĄ KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ "WENTYLACJA • KLIMATYZACJA • OGRZEWNICTWO • ŚRODOWISKO"



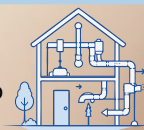
I. CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO – DROGA DO DEKARBONIZACJI

1. Systemy IV i V generacji
2. Wielkoskalowe pompy ciepła
3. Efektywność energetyczna budynków
4. Hybrydowe węzły ciepłne
5. Magazyny energii
6. Ciepło odpadowe



II. WENTYLACJA I KLIMATYZACJA – KOMFORT, ZDROWIE

1. Wentylacja inteligentna i hybrydowa
2. Filtracja i bezpieczeństwo zdrowotne
3. Chłodzenie pasywne
5. Jakość środowiska wewnętrznego



III. ŚRODOWISKO I GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO

1. Ślad węglowy
2. Oszczędność wody i ochrona wód
3. Retencja i błękitno-zielona infrastruktura
4. Odzysk ciepła i chłodu
5. Infrastruktura liniowa
6. Wentylacja miejska



IV. NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE

1. Narzędzia pracy inżyniera
2. IoT w budynkach i miastach
3. Cyfrowe zarządzanie środowiskiem
4. Inteligentne opomiarowanie
5. AI w zarządzaniu energią



TRESNA, 22-23 PAŹDZIERNIKA 2026 r.

Szczegóły wydarzenia pod linkiem: <https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026/>

Zmiany w programie Czyste Powietrze. Od 20 lipca łatwiej skorzystasz z dotacji



Fundusze Europejskie
na Infrastrukturę,
Klimat, Środowisko



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



KRAJOWY
PLAN
ODBUKOWY

Dofinansowane przez Unię Europejską – NextGenerationEU

Łatwiejszy dostęp do programu dla właścicieli domów, wyższe wsparcie na termomodernizację i więcej czasu na realizację inwestycji – to zmiany w programie Czyste Powietrze, które zaczną obowiązywać od 20 lipca 2026 r.

– Nie poprzestajemy na reformie z ubiegłego roku, ale konsekwentnie rozwijamy i zmieniamy program. Odpowiadamy na zgłaszane potrzeby mieszkańców oraz gmin i dlatego wprowadzamy od 20 lipca zmiany, które ułatwią dostęp do wsparcia. Priorytetem pozostaje dla nas bezpieczeństwo beneficjentów i jakość wykonywanych prac, tak by program rzeczywiście przyczyniał się do podnoszenia jakości życia i nie narażał na wysokie rachunki – mówi Dorota Zawadzka-Stępnia, Prezes Zarządu NFOŚiGW.

Najważniejsze zmiany:

- Łatwiejszy dostęp do programu – nowe wyjątki od zasady 3 lat własności,
- Wyższe wsparcie na termomodernizację – dodatkowe 10% na wybrane prace,
- Więcej czasu na realizację prac objętych zaliczką – 180 zamiast 120 dni,
- Łatwiejsze uzyskanie dokumentacji – więcej osób uprawnionych do potwierdzania wykonanych prac,
- Bardziej efektywne źródła ciepła – po 2026 r. koniec wsparcia dla ogrzewania elektrycznego innego niż pompy ciepła.

– Widzimy, że duża reforma programu wprowadzona w ubiegłym roku efektywnie ograniczyła nadużycia i podniosła jakość dofinansowanych inwestycji. Teraz, po szerokich konsultacjach społecznych, wprowadzamy pakiet ułatwień. Pamiętajmy, że Czyste Powietrze to nie tylko statystyki, tylko realne inwestycje na lata, zaś bezpieczeństwo beneficjentów to fundament naszego programu – mówi Robert Gajda, Zastępca Prezesa Zarządu NFOŚiGW. – Jednocześnie pracujemy nad kolejnymi rozwiązaniami, takimi jak bon na audyt energetyczny, który zostanie poddany dodatkowym, szczegółowym konsultacjom z samorządami, naszymi partnerami w programie – dodaje.

Łatwiejszy dostęp do dotacji dla części właścicieli nieruchomości

Jedną z najważniejszych zmian jest rozszerzenie wyjątków od obowiązującej zasady posiadania nieruchomości przez co najmniej 3 lata przed złożeniem wniosku o dofinansowanie. Z programu będą mogli skorzystać również

osoby, które nabyły nieruchomość przez zasiedzenie, a także właściciele lub współwłaściciele nieruchomości od co najmniej roku, którzy nabyli minimum 50 proc. udziałów w drodze zakupu lub darowizny od rodziców lub dziadków. Dzięki temu z programu łatwiej będą mogli skorzystać m.in. nowi właściciele starszych domów wymagających termomodernizacji.

Wyższe dotacje na termomodernizację

O 10 proc. wzrosną maksymalne jednostkowe kwoty dotacji na: ocieplenie ścian i innych przegród budowlanych oraz wymianę okien, drzwi zewnętrznych i bram garażowych. Podwyżka jest odpowiedzią na wzrost kosztów realizacji inwestycji w ostatnim czasie. Poprzedziła ją analiza danych GUS, ofert rynkowych oraz kosztów wynikających z wypłaconych i bieżących wniosków o płatność.

Nowe limity obejmują m.in.: ocieplenie ścian – do 275 zł/m², stolarkę okienną – do 1320 zł/m², stolarkę drzwiową – do 2750 zł/m² (w najwyższym poziomie dofinansowania). Analogicznie zwiększono maksymalne kwoty w podstawowym i podwyższonym poziomie dofinansowania.

Więcej czasu na zakończenie inwestycji

Beneficjenci korzystający z prefinansowania, od 20 lipca będą mieli więcej czasu na realizację prac objętych zaliczką – termin zostanie wydłużony ze 120 do 180 dni. Z tego rozwiązania będą mogli skorzystać również ci, którzy mają już podpisane umowy w naborze od 31 marca 2025 r. (konieczna będzie zmiana zawartej umowy).

Prostsze potwierdzanie wykonania inwestycji

Dokumenty potwierdzające trwałe odłączenie starego źródła ciepła oraz dostosowanie przewodów kominowych będą mogli wystawiać nie tylko mistrzowie kominarscy, ale również osoby posiadające odpowiednie uprawnienia budowlane. Rozwiązanie ułatwi i przyspieszy rozliczanie inwestycji.

Pozostałe zmiany od 20 lipca

Pakiet zmian obejmuje również m.in. wprowadzenie możliwości przygotowania przez beneficjentów korzystających z pomocy operatorów roboczych wersji wniosków w Generatorze Wniosków o Dofinansowanie (GWD) oraz doprecyzowanie możliwości uzyskania dotacji na urządzenia znajdujące się na liście ZUM w dniu wystawienia faktury zaliczkowej.

Zmiany dotyczące urządzeń grzewczych

Po zakończeniu okresu przejściowego, czyli po 2026 r., program nie będzie już wspierał ogrzewania elektrycznego innego niż pompy ciepła. Oznacza to koncentrację wsparcia na rozwiązaniach zapewniających najwyższą efektywność energetyczną i najlepsze efekty ekologiczne.

Fundamenty reformy programu bez zmian

Reforma programu, obowiązująca od 31 marca 2025 r., uporządkowała zasady wsparcia i wprowadziła rozwiązania zwiększające bezpieczeństwo beneficjentów. Nadal obowiązują m.in. obowiązkowy audyt energetyczny, świadectwo charakterystyki energetycznej, system operatorów, limity kosztów kwalifikowanych, zasada „jeden beneficjent – jeden budynek”, brak dofinansowania do kotłów gazowych oraz dotychczasowe poziomy dofinansowania i kryteria dochodowe.

Program potrzebny bardziej niż kiedykolwiek

Od 2018 r. Czyste Powietrze pozostaje największym w historii Polski programem wsparcia termomodernizacji domów jednorodzinnych. Pod nadzorem Ministerstwa Klimatu i Środowiska program wdraża Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW), który odpowiada za przygotowanie zasad, w tym dokumentacji

i wytycznych, pozyskuje również – we współpracy z odpowiednimi resortami – źródła na finansowanie programu. Z kolei wojewódzkie fundusze ochrony środowiska i gospodarki wodnej (WFOŚiGW) jako odrębne, niezależne od NFOŚiGW jednostki, zajmują się przyjmowaniem, rozpatrywaniem, rozliczaniem wniosków o dofinansowanie i wypłatą środków w programie na terenie swoich województw.

W programie Czyste Powietrze zawarto dotychczas 971 tys. umów o dofinansowanie, z czego zakończono ponad 645 tys. Dotychczas w programie wypłacono łącznie prawie 22 mld zł, z czego ponad połowę w ostatnich dwóch latach.

W nowej odsłonie programu obowiązującej od 31 marca 2025 r. przyjęto 70 tys. wniosków, podpisano 53 tys. umów na 3,3 mld zł. Obecny program z budżetem 10 mld zł finansowany jest ze środków Funduszu Modernizacyjnego.

Program realizowany jest we współpracy z samorządami – w gminach działa ponad 2 tys. punktów konsultacyjno-informacyjnych oraz ponad 1,4 tys. gmin-operatorów, a ok. 44% nowych wniosków składanych jest z ich udziałem.

Dzięki programowi do tej pory wymieniono ponad 603 tys. nieefektywnych źródeł ciepła, tzw. kopciuchów, których użytkowanie jest głównym powodem smogu w Polsce. Program Czyste Powietrze pozostaje potrzebny i będzie nadal rozwijany, aby skuteczniej wspierać termomodernizację domów i poprawę jakości powietrza.



Program priorytetowy
Czyste Powietrze

Współfinansowane z unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji (Funduszu Modernizacyjnego)

Forum Termomodernizacja 2026: Nowe możliwości techniczne i finansowe

14 października 2026 roku w Warszawie odbędzie się jubileuszowa, 25. edycja Forum Termomodernizacja, organizowanego przez Zrzeszenie Audytorów Energetycznych (ZAE). To jedno z najważniejszych wydarzeń branżowych w Polsce, skupiające praktyków, naukowców, biznes oraz administrację publiczną wokół przyszłości polskiego budownictwa.

Tematem przewodnim tegorocznego Forum będą: „Nowe możliwości techniczne i finansowe termomodernizacji budynków”. W obliczu unijnych celów neutralności klimatycznej i zmian w programach dotacji, tegoroczna edycja skupi się na praktycznych rozwiązaniach wspierających transformację energetyczną budynków oraz efektywne zarządzanie energią.

Kluczowe informacje:

- **Data:** 14 października 2026 r.
- **Miejsce:** Warszawa, budynek Tower-Service (ul. Tytusa Chałubińskiego 8)
- **Formuła:** Hybrydowa (stacjonarnie oraz online)
- **Rejestracja:** Rusza we wrześniu 2026 r.
- **Szczegóły:** Agenda i zapisy na stronie zae.org.pl/forum-termomodernizacja-2026



**FORUM
TERMOMODERNIZACJA
2026**

O organizatorze: Zrzeszenie Audytorów Energetycznych (ZAE) od 2000 roku zrzesza specjalistów z zakresu efektywności energetycznej. Organizacja wspiera modernizację polskiej gospodarki poprzez doradztwo, edukację oraz wyznaczanie standardów w obszarze audytów energetycznych.

Serdecznie zapraszamy do udziału!

Raporty Głównej Komisji Legislacyjnej PZITS – warto być na bieżąco

Dynamiczne zmiany przepisów prawa, pojawiające się projekty ustaw i rozporządzeń, nowe Polskie Normy oraz inicjatywy legislacyjne na poziomie krajowym i europejskim sprawiają, że śledzenie wszystkich istotnych informacji staje się coraz większym wyzwaniem. Odpowiedzią na tę potrzebę są Raporty Głównej Komisji Legislacyjnej PZITS - bezpłatne, publikowane co miesiąc opracowania przygotowywane z myślą o inżynierach, projektantach, wykonawcach, przedsiębiorcach oraz wszystkich osobach zainteresowanych zmianami w otoczeniu prawnym i technicznym branży.

Każdy raport stanowi uporządkowany przegląd najważniejszych wydarzeń z ostatniego miesiąca. W jednym miejscu gromadzone są informacje o nowych i projektowanych aktach prawnych, zmianach ustaw i rozporządzeń, projektach legislacyjnych będących na różnych etapach procesu stanowienia prawa, nowych Polskich Normach i normach europejskich, a także innych dokumentach mających znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Istotnym elementem raportów są również odsyłacze do dokumentów źródłowych – stron Rządowego Centrum Legislacji, Dziennika Ustaw, Monitora Polskiego, Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, instytucji Unii Europejskiej oraz innych oficjalnych publikatorów, dzięki czemu czytelnik może łatwo dotrzeć do pełnej treści omawianych dokumentów.



Publikacje ukazują się regularnie, co miesiąc, a na stronie internetowej PZITS dostępne są zarówno najnowsze wydania, jak i archiwum wcześniejszych raportów. Regularne korzystanie z Raportów GKL pozwala zaoszczędzić czas potrzebny na samodzielne wyszukiwanie informacji i ułatwia bieżące śledzenie zmian w przepisach oraz dokumentach technicznych.

Zachęcamy Czytelników „Ciepłownictwo Orzewnictwo Wentylacja” do regularnego korzystania z Raportów GKL PZITS.



**POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH**

Aktualne i archiwalne wydania
dostępne są na stronie:

<https://pzits.pl/raporty-gkl>

Zeskanuj kod QR i przejdź bezpośrednio
do strony z Raportami GKL.



XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza – o bezpieczeństwie, efektywności i przyszłości sektora ciepłowniczego

W dniach **8–9 października 2026 r.** w **Warszawie** odbędzie się XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza – jedno z najważniejszych regionalnych wydarzeń branży ciepłowniczej, organizowane przez **Oddział Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych w Białymstoku** oraz **Koło Zakładowe PZITS przy Enea Ciepło**. Partnerem strategicznym konferencji jest **Enea Ciepło**.

Tegoroczna edycja będzie poświęcona wyzwaniom transformacji sektora ciepłowniczego, koncentrując się na zagadnieniach efektywności energetycznej, bezpieczeństwa dostaw oraz wdrażania nowoczesnych technologii. Centralnym punktem pierwszego dnia będzie debata pt. **„Między efektywnością a bezpieczeństwem – bez kompromisów i bez złudzeń”**, podczas której eksperci, przedstawiciele przedsiębiorstw ciepłowniczych oraz instytucji publicznych porozmawiają o dekarbonizacji systemów ciepłowniczych, nowych technologiach oraz planowaniu bezpiecznej transformacji lokalnych systemów ciepła.

Program konferencji obejmuje również liczne wystąpienia poświęcone cyfryzacji i automatyzacji ciepłownictwa, zarządzaniu sieciami ciepłowniczymi, modelowaniu ciepłno-hydraulicznemu, nowoczesnym rozwiązaniom dla infrastruktury oraz poprawie efektywności i niezawodności systemów ciepłowniczych. Wśród prelegentów znajdują się przed-

stawiciele przedsiębiorstw branżowych, środowiska naukowego oraz instytucji wspierających transformację energetyczną, w tym Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Drugiego dnia uczestnicy będą mogli wysłuchać prezentacji dotyczących kierunków rozwoju systemów ciepłowniczych oraz praktycznych zastosowań nowoczesnych technologii w przedsiębiorstwach ciepłowniczych. Konferencję zakończy podsumowanie najważniejszych wniosków oraz wspólna inicjatywa promująca zrównoważony rozwój – spacer terenowy pod hasłem **„Odłóż telefon i chodź do lasu”**.

XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza stanowi forum wymiany doświadczeń i wiedzy dla przedstawicieli przedsiębiorstw ciepłowniczych, producentów technologii, projektantów, naukowców oraz wszystkich osób zaangażowanych w rozwój nowoczesnego i bezpiecznego ciepłownictwa.

Serdecznie zapraszamy przedstawicieli branży do udziału w wydarzeniu. Patronat medialny nad konferencją objął m.in. miesięcznik **Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja**.

Szczegóły:

<https://pzits.bialystok.pl/xii-podlaska-konferencja-cieplownicza>



PATRONAT HONOROWY



PARTNER STRATEGICZNY



PATRONAT MEDIALNY



XII PODLASKA KONFERENCJA CIEPŁOWNICZA

8–9 październik 2026 / Warszawa



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH
Oddział Białystok

PARTNERZY WSPIERAJĄCY



Pomaganie Buduje 2026. Jak polskie budownictwo zamienia relacje i sportową rywalizację w realną pomoc?

Za nami kolejny rekordowy maj. Już po raz trzeci polska branża budowlana zjednoczyła się wokół wspólnego celu niesienia realnej, długofalowej pomocy osobom, które jej potrzebują. Pomaganie Buduje, inicjatywa Fundacji Rodziny Maj im. Piotra Maja na stałe wpisała się w kalendarz polskiego środowiska budowlanego. Podobnie jak dobrze zaplanowana inwestycja łączy kompetencje, ludzi i odpowiedzialność, tak projekt co roku integruje przedsiębiorców, sportowców, liderów oraz partnerów społecznych, przekuwając relacje w konkretne działania.

Tam, gdzie relacje zmieniają się w konkretne działanie.

Tegoroczna edycja po raz kolejny udowodniła, że siłą branży są nie tylko wyniki finansowe, technologie i zrealizowane inwestycje. Jej prawdziwym fundamentem są ludzie, wzajemne zaufanie oraz gotowość do działania na rzecz innych. Projekt Pomaganie Buduje 2026 został oparty na trzech filarach: **biznesie, sporcie i filantropii**. W ramach inicjatywy odbyły się trzy wydarzenia: **Majowa Noc Zwycięzców, III Mistrzostwa Polski Branży Budowlanej w Kolarstwie Szosowym oraz Miasteczko Relacji** przestrzeń spotkań, wymiany doświadczeń i nawiązywania wartościowych partnerstw biznesowych.

Każde z tych wydarzeń miało inny charakter, ale wszystkie prowadziły do jednego celu: budowania wzajemnej społeczności, w której słowo „odpowiedzialność” ma realny wpływ.

Pierwszym rozdziałem tegorocznej edycji była Majowa Noc Zwycięzców. 16 maja w **Hotelu Narvil pod Warszawą** spotkało się 360 przedsiębiorców, liderów rynku, filantropów oraz przedstawicieli branży budowlanej i technologicznej. Wieczór połączył sztukę, odpowiedzialny biznes i filantropię. Podczas aukcji uczestnicy licytowali wyjątkowe przedmioty oraz doświadczenia niedostępne w regularnej sprzedaży. Największą wartością wydarzenia nie były jednak same licytacje. Gala stała się przestrzenią spotkań osób, które wierzą, że sukces biznesowy może i powinien służyć budowaniu trwałej zmiany społecznej.



Miasteczko Relacji pokazało, że networking nie musi kończyć się na wymianie wizytówek. Może być początkiem współpracy, która przynosi wartość biznesową, społeczną i ludzką.

Najważniejszy wymiar inicjatywy Pomaganie Buduje pozostaje niezmienny

Za sportowymi emocjami, biznesowymi spotkaniami i galą charytatywną stoją konkretni ludzie, ich historie oraz potrzeby. Tegoroczne zbiórki i licytacje przyniosły rekordowy rezultat. Łącznie udało się zebrać **3 029 500 zł**, to więcej niż w poprzedniej edycji.

To także najwyższy wynik w historii projektu i najlepszy dowód na to, że współpraca całego środowiska może prowadzić do realnej, mierzalnej zmiany.

Zebrane środki zostaną przeznaczone na długofalowe działania Fundacji Rodziny Maj im. Piotra Maja i jej podopiecznych a przede wszystkim na:

1. **Dom bez barier** - budowę bezpiecznego domu dostosowanego do potrzeb Kubusia Serwina;
2. **Projekt SENS** rozszerzenie programu wsparcia psychologicznego na kolejne dzieci i rodziny, realizowany wspólnie z Instytutem Matki i Dziecka w Warszawie.
3. **ODDECH 2.0** to kontynuacja długofalowej pomocy dla dzieci i rodzin objętych wsparciem psychologicznym w Ołdrzychowicach.

Pomoc nie jest tu jednorazowym gestem. Jest konsekwentnie prowadzonym procesem, którego celem jest trwała poprawa jakości życia Podopiecznych Fundacji.

Wyścig trwa dalej. Każdy może dołączyć do Peletonu Dobra

Choć główne wydarzenia tegorocznej edycji dobiegły końca, Pomaganie Buduje nadal trwa. Do 30 czerwca prowadzona jest akcja „Kilometry, które budują”, w której każdy przejechany kilometr może zostać zamieniony w realne wsparcie dla Podopiecznych Fundacji Rodziny Maj im. Piotra Maja. Do Peletonu Dobra może dołączyć każdy niezależnie od poziomu sportowego, pokonywanego dystansu czy miejsca, w którym wsiada na rower. Najważniejsze jest wspólne działanie i przekonanie, że nawet niewielki wysiłek, pomnożony przez zaangażowanie setek osób, może przynieść wielką zmianę.

Dołącz i dorzuć swoje kilometry: kilometry.pomaganiebuduje.pl

Pomaganie nabiera rozpędu

Trzecia edycja Pomaganie Buduje pokazała również coś, czego nie da się w pełni opisać samymi liczbami. Wokół inicjatywy powstała społeczność ludzi, którzy chcą wygrywać nie tylko w biznesie i sporcie, lecz także we wspieraniu inicjatyw, które łączą branże. Społeczność, która z roku na rok rośnie, inspirowa i przyciąga kolejnych przedsiębiorców, partnerów, sportowców oraz liderów.

Pomaganie Buduje powróci w 2027 roku

Przygotowania do czwartej edycji już trwają, a organizatorzy zapowiadają jeszcze większą mobilizację branży i kolejne kroki, których efektem będzie kolejne konkretne działanie.

Bo kiedy biznes, sport i odpowiedzialność społeczna jadą w jednym peletonie, zwycięstwo nie należy do jednej osoby.

Wygrywają wszyscy, którzy zdecydowali się pomagać

[Kilometry dla Fundacji | Pomaganie Buduje](#)



III Mistrzostwa Polski Branży Budowlanej w Kolarstwie Szosowym

Kilkanaście dni później emocje przeniosły się na trasę III Mistrzostw Polski Branży Budowlanej w Kolarstwie Szosowym. Na starcie stanęło **173 zawodników**.

Od pierwszych kilometrów było jasne, że będzie to jeden z najbardziej wymagających wyścigów w historii tego wydarzenia. Wysokie tempo, odważne ataki i walka z czasem do ostatnich metrów dostarczyły zawodnikom i kibicom prawdziwie sportowych emocji.

W kategorii mężczyzn zwyciężył Krzysztof Kuczyński, a wśród kobiet najszybsza była Katarzyna Konstanty. W klasyfikacji drużynowej pierwsze miejsce ex aequo zajęły trzy zespoły: **BUDIMEX, STRABAG i ERBUD**.

Choć na trasie nie brakowało rywalizacji, wszyscy uczestnicy jechali w jednym kierunku, ku wspólnemu celowi. Każdy pokonany kilometr miał znaczenie i był częścią większej historii pomocy.

Miasteczko Relacji – biznes, który buduje wartość

Równolegle w siedzibie firmy SMAY, głównego sponsora wydarzenia, działało Miasteczko Relacji. W spotkaniach uczestniczyły **333 osoby**, korzystające z systemu business matchingu, rozmów networkingowych oraz stref przygotowanych przez partnerów inicjatywy.

Program merytoryczny koncentrował się na przywództwie, rozwoju przedsiębiorców, komunikacji oraz budowaniu relacji, które mogą prowadzić do nowych projektów, partnerstw i wspólnych działań społecznych.

Wśród prelegentów znaleźli się między innymi **Tomasz Paszyna, Natalia Rybarczyk, Wiktor Tokarski oraz Monika Butryń**. Eksperti dzielili się doświadczeniem związanym ze skutecznym zarządzaniem, rozwojem liderów i budowaniem odpowiedzialnych organizacji.



JUBILEUSZOWE



Forum Ciepłowników Polskich
Polish District Heating Forum

Serdecznie zapraszamy do udziału
w XXX Forum Ciepłowników Polskich!

Międzyzdroje
13-16 września 2026

www.fcp.org.pl



Izba Gospodarcza
Ciepłownictwo Polskie

Branża grzewcza w centrum zmian. Heating Tech 2026 pokaże kierunek rozwoju rynku

W dniach **8–10 września 2026 roku** w **Ptaku Warszaw Expo** odbędzie się **Heating Tech 2026** – wydarzenie dedykowane nowoczesnym technologiom grzewczym, systemom HVAC oraz rozwiązaniom wspierającym efektywność energetyczną budynków. Targi zgromadzą producentów, dostawców technologii, projektantów, instalatorów, inwestorów i ekspertów, którzy wspólnie kształtują przyszłość sektora ogrzewnictwa.

Zmiany zachodzące na rynku energii sprawiają, że technologie grzewcze stają się jednym z najważniejszych obszarów inwestycji zarówno w budownictwie mieszkaniowym, jak i komercyjnym czy przemysłowym. Rosnące wymagania dotyczące efektywności energetycznej, rozwój odnawialnych źródeł energii oraz potrzeba ograniczania kosztów eksploatacji budynków powodują, że przedsiębiorcy i inwestorzy poszukują rozwiązań, które pozwolą im sprostać nowym wyzwaniom. Heating Tech 2026 będzie miejscem, gdzie najnowsze technologie spotkają się z realnymi potrzebami rynku.

Podczas wydarzenia zaprezentowane zostaną rozwiązania obejmujące szerokie spektrum branży grzewczej. Zwiedzający będą mogli zapoznać się z nowoczesnymi systemami ogrzewania, pompami ciepła, kotłami, urządzeniami wykorzystującymi odnawialne źródła energii, systemami wentylacyjnymi i kominowymi, a także technologiami służącymi do zarządzania energią i automatyzacji procesów w budynkach. Coraz większą rolę odgrywają dziś inteligentne instalacje pozwalające na optymalizację zużycia energii, dlatego znacząca część ekspozycji poświęcona będzie właśnie rozwiązaniom zwiększającym efektywność i komfort użytkownika obiektów.



Targi stanowią nie tylko przestrzeń prezentacji produktów, ale przede wszystkim miejsce wymiany doświadczeń i budowania relacji biznesowych. Heating Tech przyciąga przedstawicieli wszystkich segmentów rynku – od producentów urządzeń i komponentów, przez firmy instalacyjne i projektowe, po inwestorów oraz zarządców nieruchomości. Dzięki temu wydarzenie umożliwia bezpośredni kontakt pomiędzy dostawcami technologii a osobami odpowiedzialnymi za podejmowanie decyzji inwestycyjnych.

Szczególną wartością wydarzenia jest możliwość obserwowania trendów, które będą wyznaczały kierunek rozwoju branży w kolejnych latach. Rynek ogrzewnictwa coraz silniej integruje się z sektorem odnawialnych źródeł energii oraz inteligentnego zarządzania budynkami. Współczesne systemy grzewcze przestają być pojedynczymi urządzeniami, a stają się częścią kompleksowych ekosystemów energetycznych. Heating Tech 2026 pozwoli uczestnikom poznać te rozwiązania w praktyce oraz porozmawiać z ekspertami odpowiedzialnymi za ich rozwój.

Integralnym elementem wydarzenia będzie również **Warsaw**

HeatTech Congress. Program konferencyjny zgromadzi specjalistów, przedstawicieli organizacji branżowych, środowisk naukowych oraz liderów rynku. Podczas debat i wystąpień poruszane będą zagadnienia związane z innowacjami technologicznymi, bezpieczeństwem energetycznym, rozwojem nowoczesnego przemysłu oraz rolą efektywności energetycznej w budowaniu konkurencyjnej gospodarki. Kongres będzie stanowił doskonałe uzupełnienie części wystawienniczej, oferując uczestnikom dostęp do wiedzy i praktycznych doświadczeń ekspertów.



Nie bez znaczenia pozostaje także biznesowy charakter wydarzenia. Dla wystawców Heating Tech to możliwość zaprezentowania swojej oferty szerokiemu gronu profesjonalnych odbiorców, budowania rozpoznawalności marki oraz pozyskiwania nowych partnerów handlowych. Dla odwiedzających jest to natomiast szansa na porównanie dostępnych na rynku rozwiązań, konsultacje z producentami oraz zdobycie wiedzy niezbędnej do podejmowania trafnych decyzji inwestycyjnych.

Heating Tech 2026 to wydarzenie dla wszystkich, którzy chcą aktywnie uczestniczyć w rozwoju branży grzewczej i energetycznej. To miejsce spotkań innowacji, technologii i biznesu, które każdego roku przyciąga osoby poszukujące inspiracji, wiedzy i nowych możliwości współpracy.



Weź udział w Heating Tech 2026 i przekonaj się, jakie innowacje będą napędzać rozwój branży grzewczej w najbliższych latach. To wyjątkowa okazja do zdobycia wiedzy, nawiązania nowych kontaktów biznesowych oraz poznania technologii odpowiadających na wyzwania współczesnej energetyki.

Data i miejsce: 8–10 września 2026 r., Ptak Warsaw Expo, Nadarzyn k. Warszawy

Godziny otwarcia: 10:00–17:00

Dojazd: Bezpłatny parking i dogodny dojazd z Warszawy (linie 703 i 711)

Rejestracja: Rejestracja online zapewni bezpłatny bilet wstępu

ZAREJESTRUJ SIĘ!



Powrót do korzeni – przyjeźdź na Światowy Kongres Absolwentów Politechniki Wrocławskiej

Światowy Kongres Absolwentów Politechniki Wrocławskiej to międzynarodowe wydarzenie organizowane z myślą o absolwentach z każdego środowiska – niezależnie od ich obecnego zamieszkania. Ma ono łączyć społeczność dyplomatów, środowisko akademickie, biznes i administrację publiczną, a także budować przestrzeń do odnowienia starych znajomości i tworzenia nowych kontaktów.

Dlaczego warto wziąć udział w Kongresie?

Kto nie pamięta szybkiej powtórki przed egzaminami, poczucia wolności, kiedy wybijały ostatnie godziny na uczelni przed długo wyczekiwanim weekend – ale i tęsknoty za powrotem i możliwości spotkania się ze znajomymi z kierunku?

Miedzy innymi dlatego warto przyjechać na Kongres. Te momenty już nie wrócą fizycznie, ale można o nich wspominać – szczególnie z osobami, z którymi się przeżywało. Będzie to wyjątkowa okazja, by spotkać ludzi z różnych pokoleń oraz branż, posłuchać ich historii, a może nawet utożsamić się z nimi i zawrzeć nowe przyjaźnie.

Co w programie wydarzenia?

Nie będzie nudy! W programie przewidziane jest wiele atrakcji, a do najważniejszych należą:

- ▶ spotkania na wydziałach – chyba każdy na swój sposób czuje sentyment do budynku, w którym spędził tyle niezapomnianych chwil
- ▶ uroczysta kolacja i impreza taneczna, gdzie każdy będzie mógł odetchnąć od codzienności i dobrze się bawić

- ▶ przerwy kawowe, podczas których nie starczy czasu na przegadanie wszystkich studenckich szaleństw,
- ▶ krótkie wystąpienia na przeróżne tematy – od technologii, przez biznes, well-being, po społeczne zaangażowanie i kulturę, co najważniejsze – prowadzone przez absolwentów,
- ▶ wystawa projektów z Politechniki Wrocławskiej – jak komputer może zbierać informacje o aktywności mózgowej? Jak łazik jeździ po Ziemi zamiast po Marsie? Te, jak i inne projekty będą dostępne do przetestowania.

Najważniejsze informacje

Wszystkie niezbędne informacje znajdują się na oficjalnej stronie Światowego Kongresu Absolwentów PWr i są na bieżąco aktualizowane.

Data: 16–17 października w 2026 roku

Miejsca: Kampus Politechniki Wrocławskiej – Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, Wrocław.

Stowarzyszenie Absolwentów Politechniki Wrocławskiej serdecznie zaprasza do wzięcia udziału w tym wyjątkowym wydarzeniu!

Szczegóły: <https://absolwent.pwr.edu.pl>



ŁĄCZY NAS WIĘCEJ NIŻ STUDIA

2026

MATERIALS, STRUCTURES, TECHNOLOGIES AND MANAGEMENT IN CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

INTERNATIONAL CONFERENCE



MSTM26'

ORGANIZERS



OD 2010 ROKU

QUALITY AND PRODUCTION
MANAGERS ASSOCIATION



DEPARTMENT OF BUILDING
PROCESSES ENGINEERING,
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
CZĘSTOCHOWA UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

THE CONFERENCE IS POINTED ON MODERN AND
INNOVATIVE THEORETICAL AND PRACTICAL
PROBLEMS OF SUSTAINABLE BUILDING AND
EXCHANGE OF KNOWLEDGE AND EXPERIENCE
BETWEEN THE SCIENTIFIC COMMUNITY AND
INDUSTRY.

THE AIM OF THE CONFERENCE IS TO PRESENT THE
LATEST MATERIAL, TECHNOLOGICAL, CONSTRUCTION
AND SAFE SOLUTIONS FOR MANAGING THE
INVESTMENT AND CONSTRUCTION PROCESS IN
MODERN CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING.



<https://wb.pcz.pl/nauka/mstm>



Czestochowa, Poland

NOV

25-26

2026





Akredytowane Laboratorium Badawcze Veolia Energia Warszawa S.A.

ul. Siemieńskiego 4, 02-106 Warszawa

- Kompleksowe badanie rur, złączy i kształtek preizolowanych
- Badanie mat (poduszek) kompensacyjnych i izolacji termicznych
- Kontrola jakości materiałów dostarczanych na budowę s.c.



Europejska jakość, szeroka oferta i konkurencyjne ceny



Rekomendacja Europejskiego Stowarzyszenia Ciepłowników



Bogate doświadczenie i doradztwo techniczne

Zapytaj o szczegóły



510 000 493, 602 764 822



vew.laboratorium@veolia.com

www.energiadlawarszawy.pl



® **ZPUM**

LIDER NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII



Produkcja rur metodą Conti

pojedyncze i podwójne, w zakresie średnic rury osłonowej do Dz355 mm z aluminiową barierą dyfuzyjną lub bez bariery



WWW.ZPUM.PL/EN 

