INSTYTUT EKOLOGII AKUSTYCZNEJ

CICHE CHŁODZENIE SIĘ OPŁACA

Alternatywne systemy chłodzenia centrów danych: wpływ na hałas (w tym niskotonowy) oraz analiza opłacalności

Opracowanie informacyjne i zasób do pobrania
dla organizacji społecznych, samorządów i mediów

TEZA PRZEWODNIA: 1 euro zainwestowane w środki ochrony przed hałasem zwraca się jako 10 euro korzyści społecznych - badanie zlecone przez Komisję Europejską, cytowane w raporcie EEA „Environmental noise in Europe 2025".

Opracowanie: Instytut Ekologii Akustycznej
Wersja: 29 lipca 2026 r.
Licencja: Creative Commons Uznanie autorstwa -
Użycie niekomercyjne - Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC-SA 4.0)

Streszczenie dla decydentów i mediów

Alternatywne systemy chłodzenia centrów danych - chłodzenie cieczowe bezpośrednie (direct-to-chip) oraz immersyjne (zanurzeniowe) - są jednocześnie korzystniejsze środowiskowo, cichsze i w perspektywie dekady tańsze od klasycznego chłodzenia powietrzem. Powszechne stosowanie rozwiązań „głośnych" nie wynika więc z ich długofalowej przewagi finansowej, lecz z trzech mechanizmów: wysokiego kosztu początkowego (CAPEX), braku wyceny kosztów zewnętrznych hałasu w rachunku inwestora oraz z luki regulacyjnej, która nie mierzy hałasu niskotonowego.

Najważniejsze ustalenia:

- 10-letni koszt posiadania (TCO) klastra AI o 64 szafach serwerowych wynosi około 42 mln USD dla chłodzenia powietrznego, 31 mln USD dla direct-to-chip i 28 mln USD dla immersji jednofazowej - czyli różnica na korzyść cichej technologii sięga 14 mln USD.
- Koszt początkowy (CAPEX) immersji jest jednak 1,5–2,2 razy wyższy: 4 300–6 500 USD/kW wobec 1 800–3 200 USD/kW dla chłodzenia powietrznego. To główna bariera decyzyjna.
- Okres zwrotu wyższego CAPEX wynosi poniżej 3 lat dla instalacji o gęstości powyżej 30 kW na szafę przy cenie energii 0,12 USD/kWh.
- Immersja jest opisywana jako „praktycznie bezgłośna" (virtually silent) i redukuje zużycie wody o 95–98% w porównaniu z chłodzeniem ewaporacyjnym.
- Hałas transportowy w Europie kosztuje co najmniej 95,6 mld EUR rocznie, czyli około 0,71% PKB regionu - dla Polski to szacunkowo 26-28 mld złotych rocznie. Centra danych dopisują nowe źródło do tego rachunku.
- Zwrot z inwestycji w ochronę przed hałasem wynosi 10:1 według badania KE, a WHO wskazuje nawet 16:1.

1. Postawienie problemu: dlaczego chłodzenie centrum danych to sprawa społeczna

Centra danych to jedne z najszybciej rosnących źródeł przemysłowego hałasu środowiskowego. Kluczowym problemem nie jest głośność mierzona w decybelach ważonych A, lecz charakter emitowanego dźwięku: stały, tonalny, niskoczęstotliwościowy „hum" pracujący 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu, bez przerwy.

Skąd bierze się hałas w centrum danych

Źródło	Poziom / charakter	Znaczenie akustyczne
Wentylatory chillerów powietrznych	do 100 dBA przy urządzeniu, ton dyskretny (blade-pass)	Główne źródło dla otoczenia; ton niskoczęstotliwościowy przenika bariery akustyczne
Centrale wentylacyjne (AHU) na dachu	85–100 dBA	Kilkanaście jednostek na dachu jednego obiektu
Wieże chłodnicze	do 85 dB	Emisja szerokopasmowa plus komponenty mechaniczne
Agregaty prądotwórcze (testy)	110 dBA, częstotliwość podstawowa 75–90 Hz	Obowiązkowe testy comiesięczne; szczyt energii w pasmach 31,5–250 Hz
Wentylatory serwerowe	do 90 dBA wewnątrz hali	Pobierają 400–1 000 W na węzeł; tłumione przez obudowę budynku

> **MECHANIZM: Pułapka pomiarowa: ważenie A tłumi częstotliwość 63 Hz o około 26 dB, a poniżej 20 Hz nawet o ponad 40 dB. Realny hałas 70 dB przy 31,5 Hz może zostać zaraportowany jako „bezpieczne" 30,6 dBA. Formalnie norma jest spełniona, mieszkańcy mają bezsenność.**

WHO już w 1999 roku rekomendowało stosowanie ważenia C (dBC) przy dominujących składowych niskotonowych - wytyczne te nie zostały od tego czasu zrewidowane. Tylko 4 z 27 krajów Unii Europejskiej (15%) posiada odrębne regulacje dla hałasu niskotonowego: między innymi Niemcy (norma DIN 45680, wymagająca szczegółowej oceny przy różnicy LC-LA ≥ 20 dB) i Dania. Polska nie ma żadnych przepisów środowiskowych odnoszących się bezpośrednio do LFN.

2. Przegląd technologii chłodzenia i ich profil akustyczny

2.1 Chłodzenie powietrzne (punkt odniesienia)

Standard rynkowy: agregaty chillerowe chłodzone powietrzem, centrale CRAC/CRAH, wieże chłodnicze. Osiąga PUE (współczynnik efektywności energetycznej) na poziomie 1,45–1,60, a w starszych obiektach 1,50–1,80. Oznacza to, że na każdy wat pracy obliczeniowej zużywa się dodatkowo 0,45–0,80 W na chłodzenie i infrastrukturę.

2.2 Direct-to-Chip (DLC) - chłodzenie bezpośrednie na chipie

Ciecz chłodząca (najczęściej woda z glikolem) trafia przez zimne płyty (cold plates) bezpośrednio na procesor, usuwając nawet 90% ciepła generowanego w szafie. Eliminuje to większość wentylatorów serwerowych. PUE: 1,08–1,20.

Efekt akustyczny: umiarkowany - pozostają zewnętrzne wymienniki i chillery, które przy chłodzeniu powietrznym nadal generują komponent niskotonowy. Norma ASHRAE TC 9.9 rekomenduje DLC już powyżej 20 kW na szafę.

2.3 Immersja jednofazowa

Serwery są w całości zanurzone w dielektrycznym płynie niewrzącym, odbierającym ciepło przez konwekcję. Całkowicie eliminuje wentylatory serwerowe. PUE: 1,03–1,08. Producenci wskazują wprost, że „chłodzenie cieczą nie wymaga wentylatorów i generuje zerowy hałas" na poziomie serwera.

Przykład wdrożenia: singapurski Sustainable Metal Cloud osiągnął PUE 1,10 dla serwerów H100 HGX w immersji jednofazowej, przy zużyciu 6,58 kW na węzeł wobec 9–11 kW dla równoważnych systemów powietrznych - czyli 30–40% mniej energii.

2.4 Immersja dwufazowa

Ciecz dielektryczna wrze w kontakcie z gorącymi komponentami, para kondensuje na wymienniku i wraca do zbiornika w zamkniętym obiegu. PUE: 1,02–1,05. Współczynnik efektywności (COP) jest o 72–79% wyższy niż w immersji jednofazowej w zakresie 6,6–15,9 kW. Metoda ta eliminuje wentylatory i inne elementy mechaniczne wprowadzające hałas i wibracje.

2.5 Chłodzenie adiabatyczne i free cooling

Chłodzenie adiabatyczne wykorzystuje odparowanie wody do wstępnego schłodzenia powietrza wlotowego. Free cooling korzysta z chłodnego powietrza zewnętrznego - w klimacie Polski przez większą część roku. Oba rozwiązania redukują zużycie energii, ale nadal wymagają dużych wentylatorów. Wpływ na hałas: umiarkowany. Istotne jest tu stosowanie wentylatorów z regulacją prędkości (VFD), które rozpraszają energię tonu blade-pass na szersze pasmo, redukując tonalny charakter hałasu, choć nie jego całkowitą moc.

Zestawienie porównawcze

Metoda	PUE	Wpływ na hałas	Wpływ na LFN	Zużycie wody	Dojrzałość
Powietrzne	1,45–1,80	Wysoki (do 100 dBA)	Wysoki (pasmo 20–250 Hz)	2–5 mln galonów/MW/rok	Standard
Direct-to-Chip	1,08–1,20	Umiarkowany	Zależny od chłodzenia zewnętrznego	Umiarkowane	Komercyjne, szerokie
Immersja 1-fazowa	1,03–1,08	Niski	Niski	Bliskie zeru (–95–98%)	Komercyjne
Immersja 2-fazowa	1,02–1,05	Bardzo niski	Bardzo niski	Zero	Wczesna komercjalizacja
Adiabatyczne / free cooling	zmienne	Średni (szerokopasmowy)	Umiarkowany	Wysokie (adiabatyczne)	Komercyjne
Podwodne (eksperyment)	n/d	Minimalny dla otoczenia	Minimalny	n/d	Eksperymentalne

3. Metody eksperymentalne i w fazie testów

3.1 Podwodne centra danych - Microsoft Project Natick

Microsoft zanurzył kontener z 864 serwerami na dnie morza u wybrzeży Wysp Orkney w Szkocji na okres dwóch lat (2018–2020), wykorzystując stałą niską temperaturę wody morskiej i wymienniki ciepła podobne do stosowanych w okrętach podwodnych. Wynik: ośmiokrotnie niższa awaryjność serwerów niż na lądzie, przypisywana atmosferze azotowej i brakowi ingerencji człowieka.

Znaczenie akustyczne: umieszczenie infrastruktury chłodzącej pod wodą praktycznie eliminuje emisję hałasu do środowiska zamieszkanego przez ludzi. Program został jednak wstrzymany po fazie dowodowej - Microsoft nie skaluje obecnie tej technologii komercyjnie, mimo pozytywnych wyników technicznych. To istotny argument w debacie: brak kontynuacji nie wynikał z porażki technologicznej.

3.2 Chłodzenie geotermalne i wykorzystanie wód gruntowych

Coraz częściej testowane jest wykorzystanie wód gruntowych, jezior lub morza jako naturalnego wymiennika ciepła dla centrów danych lądowych. Zaletą akustyczną jest zastąpienie wentylatorów osiowych pompami cyrkulacyjnymi, generującymi znacznie mniej energii w zakresie niskich częstotliwości.

3.3 Nowe płyny dielektryczne o niskim GWP

Trwają intensywne prace nad płynami do immersji dwufazowej o niższym potencjale tworzenia efektu szklarniowego i lepszych właściwościach wrzenia. Rozwiązania te są w fazie pilotaży w klastrach AI i HPC. Jest to obszar rozwoju o dużym znaczeniu, ponieważ obecne płyny fluorokarbonowe stanowią problem środowiskowy, który przeciwnicy technologii wykorzystują jako kontrargument.

3.4 Odzysk ciepła odpadowego (heat reuse)

Projekty odzysku ciepła - na przykład zasilanie ciepłem odpadowym miejskich sieci ciepłowniczych w Skandynawii - wymuszają stosowanie chłodzenia cieczowego wysokotemperaturowego, które z natury generuje mniej hałasu niż chłodzenie powietrzne. Superkomputer TIGER na Uniwersytecie Princeton stosuje chłodzenie ciepłą wodą z odzyskiem ciepła do kogeneracji, zimą wyłącza chillery mechaniczne, korzystając z powietrza zewnętrznego przez wielkie żaluzje, i osiąga oszczędność blisko 148 mln kBtu energii rocznie.

3.5 Aktywna redukcja szumów (ANC)

Systemy generujące falę w przeciwfazie do dominującego tonu wentylatora są testowane, ale ich skuteczność jest ograniczona przy zmiennej prędkości obrotowej. To rozwiązanie niszowe - nie substytut zmiany technologii chłodzenia.

4. Analiza finansowa: czy „ciche" jest nieopłacalne?

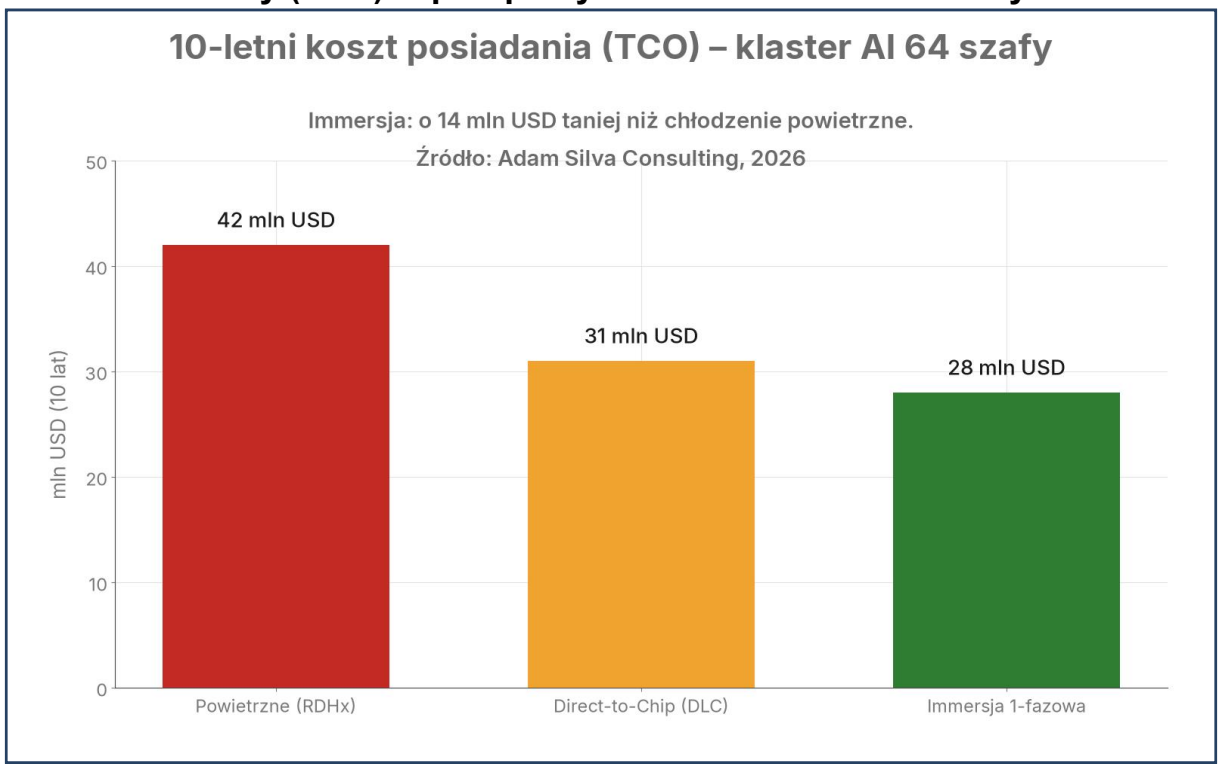
To pytanie stanowi rdzeń niniejszego opracowania. Odpowiedź brzmi: nie - ciche technologie są opłacalne, ale w innym horyzoncie czasowym niż ten, w którym podejmowane są decyzje inwestycyjne.

4.1 Koszt początkowy (CAPEX) - źródło bariery

Technologia	CAPEX (USD/kW)	OPEX roczny na szafę (40 kW, 0,12 USD/kWh)
Powietrzne (RDHx)	1 800 – 3 200	48 000 – 65 000 USD
Direct-to-Chip	3 500 – 5 000	32 000 – 40 000 USD
Immersja jednofazowa	4 300 – 6 500	28 000 – 34 000 USD

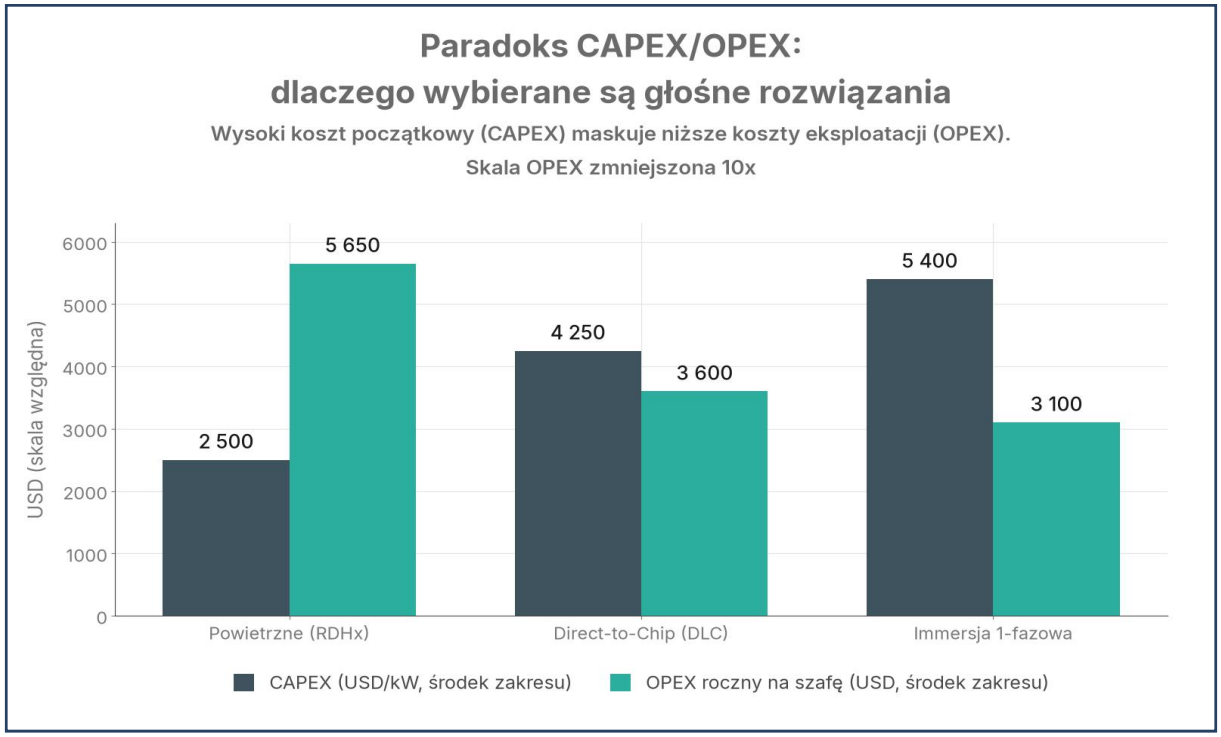
Blok immersyjny o mocy 1 MW od uznanych dostawców (LiquidStack, Submer, Green Revolution Cooling) kosztuje 2,5–3,5 mln USD, czyli około dwukrotnie więcej niż równoważne chłodzenie powietrzne. Rozbicie składników: zbiorniki 3 000–8 500 USD za sztukę (30 000–50 000 USD za zbiornik 42U wysokiej gęstości), jednostki CDU 12 000–35 000 USD, płyn dielektryczny 25–300 USD za litr (20 000–240 000 USD na zbiornik 800-litrowy), suche chłodnice 800–1 600 USD za kW.

4.2 Koszt całkowity (TCO) w perspektywie 10 lat - odwrócenie wyniku



Wykres 1. 10-letni TCO klastra AI o 64 szafach. Dane: Adam Silva Consulting, 2026.

Przy 16 szafach różnice są niewielkie i decyzja wygląda jak błąd zaokrąglenia: 8,5 mln USD dla powietrza, 7,2 mln dla DLC, 6,9 mln dla immersji. Przy 64 szafach różnice stają się strukturalne: 42 mln, 31 mln i 28 mln USD. Wynika to z trzech nakładających się źródeł oszczędności: różnicy PUE (1,45–1,60 wobec 1,03–1,08), redukcji powierzchni o 60–75% (dla obiektu 10 000 stóp kwadratowych skondensowanego do 2 500 to około 1,5 mln USD oszczędności rocznie) oraz redukcji zużycia wody o 95–98%.



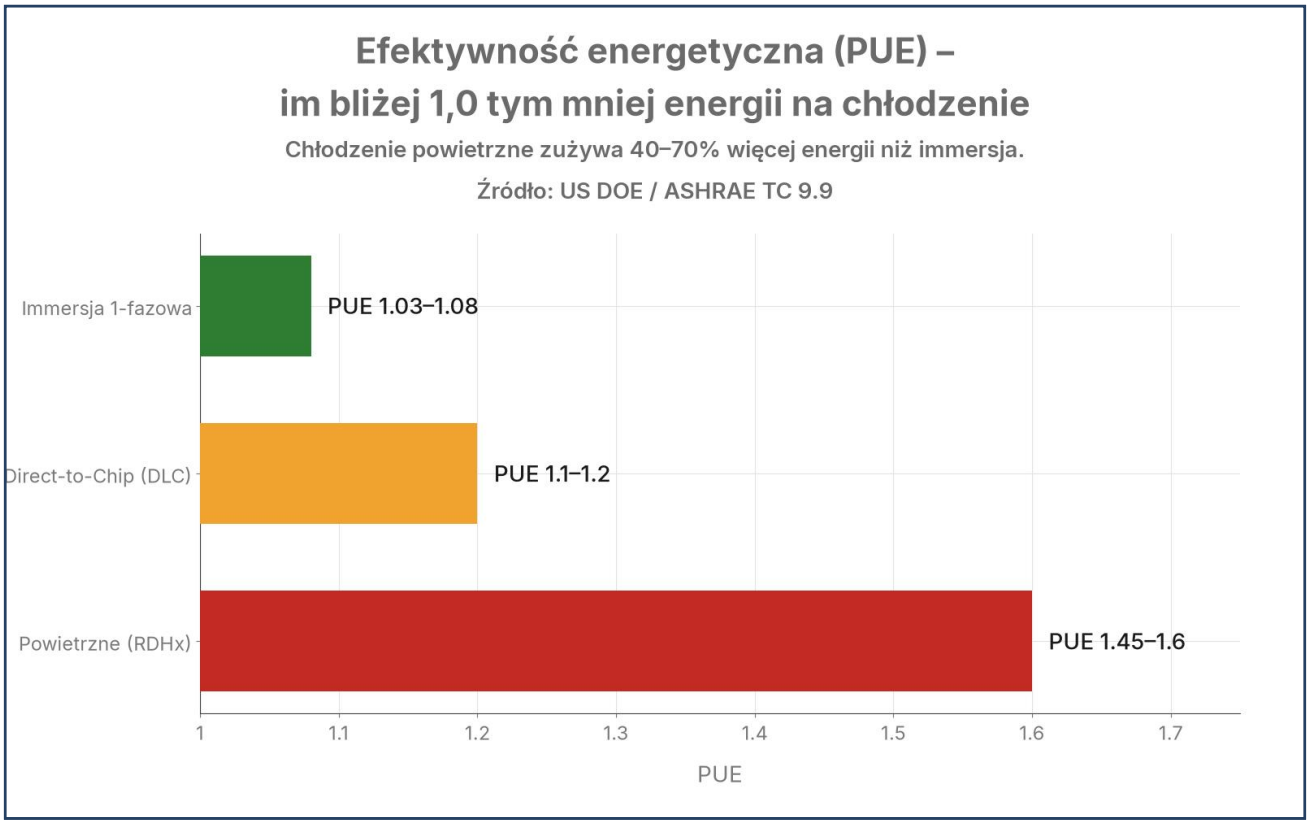
Wykres 2. Mechanizm paradoksu decyzyjnego: wyższy koszt początkowy przy niższych kosztach eksploatacji.

PRÓG DECYZYJNY: Punkt przegięcia (Cooling Inflection Point): przy cenie energii 0,12 USD/kWh próg opłacalności chłodzenia cieczowego wypada przy gęstości około 30 kW na szafę. Przy 0,15 USD/kWh spada do 24 kW na szafę. Średnia gęstość szafy w 2026 roku wynosi już 27 kW - czyli większość nowych instalacji AI znajduje się powyżej progu opłacalności.

4.3 Skala 100 MW: DLC kontra immersja

Pozycja	DLC	Immersja	Różnica
CAPEX całkowity	690–800 mln USD	590–690 mln USD	15–20% oszczędności
OPEX 10-letni	2,2–2,6 mld USD	1,3–1,6 mld USD	35–40% oszczędności
TCO 10-letnie	2,9–3,4 mld USD	1,9–2,3 mld USD	30–35% oszczędności

Warto zauważyć, że w tej analizie technologia najcichsza jest jednocześnie najtańsza w obu wymiarach - także w CAPEX. To podważa uproszczoną narrację, że ochrona przed hałasem zawsze kosztuje.



Wykres 3. PUE - energia zużywana na chłodzenie ponad potrzeby obliczeniowe.

4.4 Ukryta premia: wydajność obliczeniowa

Argument, który rzadko trafia do debaty publicznej, a jest decydujący dla inwestora: chłodzenie cieczowe podnosi wydajność tego samego sprzętu. Testy porównawcze Supermicro na identycznych układach GPU wykazały 54 TFLOPs na GPU w konfiguracji cieczowej wobec 46 TFLOPs w powietrznej - czyli 17% więcej przepustowości wyłącznie z tytułu chłodzenia. Pobór mocy węzła spada o 1 kW (16%), a temperatura złącza GPU utrzymuje się na poziomie 41–50°C wobec 54–72°C.

Łącznie: 17% wyższa przepustowość przy 16% niższym poborze mocy daje 1,39-krotnie więcej tokenów na wat mocy obiektu. Karta NVIDIA B200 pracuje z TDP 1 200 W przy chłodzeniu cieczą i tylko 1 000 W przy chłodzeniu powietrzem - kto płaci cenę B200 i chłodzi ją powietrzem, płaci pełną cenę za 84% wydajności.

5. Koszty zewnętrzne hałasu - brakująca strona rachunku

Rachunek inwestora nie obejmuje kosztów, które ponosi społeczeństwo. Te koszty są policzone i ich skala jest ogromna.

Wskaźnik	Wartość	Źródło
Roczny koszt ekonomiczny hałasu transportowego w Europie	co najmniej 95,6 mld EUR (0,6% PKB regionu)	EEA, Environmental noise in Europe 2025
Szacunkowy koszt dla Polski (0,6% PKB 3,64 bln zł)	21–22 mld zł rocznie	IEA, obliczenia własne na danych EEA
Udział w budżecie NFZ 2024 (190,7 mld zł)	około 11%	IEA / NFZ
Utracone lata życia w zdrowiu (DALY) w Europie	1,5 mln rocznie	EEA 2026
Przedwczesne zgony w UE związane z hałasem	73 000 rocznie	EEA 2026
Nowe przypadki chorób układu krążenia	około 50 000 rocznie	EEA 2026
Osoby narażone na szkodliwy hałas w Europie	112 mln (ponad 20% populacji)	EEA 2025
Zwrot z inwestycji w środki ochrony przed hałasem	10 EUR na każde 1 EUR	badanie zlecone przez Komisję Europejską
Zwrot wg WHO	do 16:1	WHO, cyt. w stanowisku IEA

> **ROZBICIE KOSZTÓW: Struktura kosztów społecznych hałasu według szwajcarskiego urzędu FOEN (2,8 mld CHF rocznie, około 11,5 mld zł): koszty zdrowotne około 70%, utrata produktywności około 25%, spadek wartości nieruchomości około 5%.**

Przełożenie na język inwestora: skoro każde 1 EUR wydane na ochronę przed hałasem zwraca 10 EUR korzyści społecznych, to premia CAPEX w wysokości 2–3 mln USD na blok 1 MW cichej technologii - nawet gdyby nie zwracała się w rachunku operatora - jest głęboko uzasadniona w rachunku publicznym. A jak pokazuje rozdział 4, zwraca się także w rachunku operatora, w ciągu około trzech lat.

6. Dlaczego więc wybierane są rozwiązania „trujące"? Siedem mechanizmów

1. Asymetria CAPEX–OPEX. Koszt początkowy immersji jest 1,5–2,2 razy wyższy. Decyzje inwestycyjne w branży są rozliczane w horyzoncie 2–3 lat, a przewaga technologii cichych ujawnia się w horyzoncie 10 lat.
2. Rozdzielenie budżetów. Kto buduje obiekt (deweloper, CAPEX), często nie płaci rachunków za energię (najemca, OPEX). Nie ma bodźca, by ponieść wyższy koszt początkowy.
3. Koszty zewnętrzne nie są internalizowane. Hałas nie ma ceny w rachunku inwestora. 26–28 mld zł rocznych kosztów zdrowotnych w Polsce nie obciąża sprawozdania finansowego żadnej spółki.
4. Luka regulacyjna w pomiarze. Normy oparte na dBA nie wychwytują hałasu niskotonowego, który jest dominującą składową emisji chillerów. Formalna zgodność z normą zwalnia z obowiązku modernizacji.
5. Inercja technologiczna i luka kompetencyjna. Brak wykwalifikowanych kadr do obsługi układów cieczowych. Rynek odpowiada modelem „Cooling-as-a-Service" - przejęcie CoolIT Systems przez Ecolab za 4,75 mld USD sygnalizuje, że problem kompetencji jest rozwiązywany usługowo.
6. Retrofit jest droższy niż nowa budowa. Modernizacja istniejących obiektów powietrznych na cieczowe jest kosztowna, co utrwala status quo. Prognozy wskazują, że przez najbliższe 5 lat obiekty chłodzone powietrzem pozostaną większością.
7. Marketing dostawców. Część producentów pozycjonuje chłodzenie cieczowe jako „wybór środowiskowy", a nie jako „wybór wydajnościowo-ekonomiczny", co osłabia argumentację biznesową i przesuwa ją do sfery dobrowolnego CSR.

7. Rekomendacje

Dla organizacji społecznych i mieszkańców

- Żądać pomiarów w ważeniu C (dBC) oraz analizy widmowej w pasmach oktawowych lub tercjowych, nie tylko dBA - zgodnie z rekomendacją WHO z 1999 roku, wciąż aktualną.
- Podnosić w konsultacjach argument najlepszej dostępnej techniki (BAT): technologie ciche istnieją, są komercyjnie dostępne i tańsze w perspektywie 10 lat. Ich niezastosowanie jest wyborem, nie koniecznością.
- Nie zadowalać się ekranami akustycznymi. Fizyka niskich częstotliwości ogranicza ich skuteczność - w jednym z udokumentowanych przypadków bariera warta 5 mln USD nie rozwiązała problemu mieszkańców.
- Przedstawiać rachunek 10:1 z raportu EEA jako argument ekonomiczny, nie tylko zdrowotny - to język, na który reagują samorządy i inwestorzy.

Dla samorządów i organów administracji

- Wprowadzać wymóg raportowania PUE i WUE oraz analizy akustycznej w pasmach oktawowych na etapie decyzji o warunkach zabudowy i pozwolenia na budowę.
- Wzorować się na kierunku regulacyjnym UE: dyrektywa EED nakłada obowiązek raportowania PUE i WUE od 2026 roku, a stany Kalifornia (AB 1577), Michigan (SB 762) i Iowa (HF 2447) wymagają kwartalnych ujawnień zużycia energii i wody.
- Ustanawiać strefy buforowe między centrami danych a zabudową mieszkalną i obiektami wrażliwymi (szkoły, szpitale) - EEA wskazuje takie rozwiązania jako skuteczne.

Dla ustawodawcy krajowego

- Wprowadzić do prawa polskiego kryteria oceny hałasu niskotonowego, wzorem niemieckiej normy DIN 45680 (kryterium różnicy LC-LA ≥ 20 dB) lub przepisów duńskich.
- Uruchomić krajowy rachunek kosztów hałasu - obecnie nie istnieje, a szacunki oparte na metodyce EEA wskazują na 26–28 mld zł rocznie.

Źródła i linki

Koszty społeczne i regulacje

- European Environment Agency, Environmental noise in Europe 2025 – summary for policymakers: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-noise-in-europe-2025
- Komisja Europejska, COM(2023) 139 final – raport wdrożeniowy dyrektywy END: https://environment.ec.europa.eu/system/files/2023-03/COM_2023_139_1_EN_ACT_part1_v3.pdf
- Instytut Ekologii Akustycznej, Stanowisko eksperckie – hałas komunikacyjny: https://instytut.ngo/wp-content/uploads/2026/02/IEA-Stanowisko-eksperckie-halas-komunikacyjny.pdf
- Instytut Ekologii Akustycznej, Raport: Hałas pod czy poza kontrolą: https://instytut.ngo/wp-content/uploads/2026/04/Raport-Halas-pod-czy-poza-kontrolna.pdf
- Instytut Ekologii Akustycznej, Normy hałasu w Polsce vs zalecenia WHO: https://instytut.ngo/normy-halasu-w-polsce-vs-zalecenia-who/
- Instytut Ekologii Akustycznej, Jak hałas niskotonowy niszczy nasze serce: https://instytut.ngo/halas-niskotonowy-a-osierdzie/
- Pawlaczyk-Łuszczyńska M., Review of evaluation criteria for infrasound and low frequency noise (CIOP-PIB): https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/95674/2022111512226&R_3_Article_Pawlaczyk_Review_OK.pdf

Ekonomia chłodzenia centrów danych

- Adam Silva Consulting, Data Center Cooling Economics 2026: Liquid vs Air vs Immersion: https://www.adamsilvaconsulting.com/insights/data-center-cooling-economics-2026
- IT Availability, Cost Comparison: 100MW Direct Liquid to Chip vs Liquid Immersion Datacenter (2025)
- Schneider Electric, Capital Cost Analysis of Immersive Liquid-Cooled vs. Air-Cooled Large Data Centers: https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP282_EN/
- Harvard DASH, Liquid versus Air: Life Cycle Carbon: https://dash.harvard.edu/server/api/core/bitstreams/17cb464c-407a-4bf7-81fb-04b5e9d924eb/content
- Data Center Dynamics, Liquid cooling: do the math: https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/liquid-cooling-do-the-math/
- Chemours, Immersion Cooling: An Analysis of Efficiency and Cost Across Global Climates

Technologie i hałas

- Elk River Data Center, Data Center Noise: What It Is and Why the Standard Does Not Capture It: https://elkriverdatacenter.com/research-analysis/data-center-noise-explained/
- Data Center Knowledge, What are the 5 Main Causes of Noise in Data Centers: https://www.datacenterknowledge.com/data-storage/what-are-the-5-main-causes-of-noise-in-data-centers-
- INVC, Data Centre Noise Control: https://invc.com/noise-control/data-center-noise-attenuation/
- EESI, Communities Are Raising Noise Pollution Concerns About Data Centers: https://www.eesi.org/articles/view/communities-are-raising-noise-pollution-concernsabout-data-centers

- Sierra Club, Data Center Factsheet (2025): https://www.sierraclub.org/sites/default/files/2025-07/data-center-factsheet-4.pdf
- Schneider Electric Blog, Silencing Your Noisy Data Center Infrastructure with Liquid Cooling: https://blog.se.com/datacenter/2019/01/18/silencing-your-noisy-data-center-infrastructure-with-liquid-cooling/
- Zhou K. i in., Immersion cooling technology development status of data centers, STET Review 2024: https://www.stet-review.org/articles/stet/full_html/2024/01/stet20240005/stet20240005.html
- Araner, Two-phase immersion cooling for servers: https://www.araner.com/blog/two-phase-immersion-cooling-for-servers
- Chen X. i in., Efficient two-phase liquid cooling and optimization, 2025: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125006677
- Ahmadi V.E. i in., Performance evaluation of two-phase direct-to-chip liquid cooling, 2026: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X26000122
- Supermicro, What Is Direct-to-Chip Liquid Cooling: https://www.supermicro.com/en/glossary/direct-to-chip-liquid-cooling
- DCX, Direct-to-Chip Cooling: https://dcx.eu/direct-to-chip-cooling/
- Vertiv, Immersion cooling systems: Advantages and deployment: https://www.vertiv.com/en-us/insights/articles/blog-posts/advancing-data-center-performance-with-immersion-cooling/
- Vertiv, Freecooling, Evaporative and Adiabatic Cooling Solutions
- Microsoft, Microsoft finds underwater datacenters are reliable (Project Natick): https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/
- Cooling Best Practices, Adiabatic Cooling Keeps Pace with Growing Data Center Heat Density: https://coolingbestpractices.com/system-assessments/water-savings/adiabatic-cooling-keeps-pace-growing-data-center-heat-density

--

KONIEC DOKUMENTU

Opracowanie przygotowane przez Instytut Ekologii Akustycznej - Organizację Pożytku Publicznego działającą od 2014 roku. Nasza misja to kształtowanie harmonijnej przestrzeni akustycznej dla lepszej jakości życia poprzez badania, edukację społeczną, interwencje obywatelskie i promocję nowych badań.

Licencja: CC BY-NC-SA 4.0 - uznanie autorstwa, użycie niekomercyjne, na tych samych warunkach. Wolno kopiować, rozpowszechniać i przetwarzać materiał w celach niekomercyjnych, pod warunkiem podania autorstwa i zachowania tej samej licencji dla utworów pochodnych. Pełny tekst licencji: creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.pl

Warunek użycia niekomercyjnego ogranicza wyłącznie licencjobiorcę i nie dotyczy Instytutu jako właściciela praw majątkowych. Podmiotom zainteresowanym wykorzystaniem komercyjnym udzielamy odrębnej licencji odpłatnej - wpływy przeznaczamy w całości na działalność statutową.

Kontakt w sprawie licencji, danych źródłowych i współpracy: ekologia.akustyczna@proton.me | instytut.ngo