

Rola chłodzenia pasywnego w bilansie cieplnym gruntu i poprawie efektywności systemu zasilanego gruntową pompą ciepła

The role of passive cooling in the thermal balance of the ground and in improving the efficiency of a ground-source heat pump system

AGNIESZKA CHMIELEWSKA, EWELINA STEFANOWICZ, JULIA SAWICKA

DOI 10.36119/15.2025.10.1

W artykule przedstawiono analizę wpływu regeneracji dolnego źródła ciepła na efektywność działania systemu z gruntową pompą ciepła (GPC) w budynku mieszkalnym we Wrocławiu. W oparciu o dynamiczny model energetyczny zaimplementowany w programie TAS EDSL [1] oraz analizę działania wymiennika ciepła w programie Earth Energy Designer [2] porównano dwa warianty: z pasywnym chłodzeniem (free-cooling) oraz bez pasywnego chłodzenia. Wyniki wskazują, że regeneracja wymiennika gruntowego w okresie letnim pozwala na utrzymanie wyższej temperatury czynnika roboczego, stabilizację funkcjonowania pompy ciepła oraz na poprawę współczynnika efektywności sezonowej ($SCOP_{on}$). Zastosowanie systemu chłodzenia pasywnego dodatkowo poprawia komfort cieplny wewnątrz budynku przy niskim nakładzie energetycznym. Praca potwierdza zasadność projektowania układów GPC z funkcją letniej regeneracji gruntu jako elementu podnoszącego efektywność energetyczną i środowiskową instalacji. *Słowa kluczowe:* gruntowa pompa ciepła, gruntowy wymiennik ciepła, free-cooling, chłodzenie pasywne, EDSL TAS, Earth Energy Designer

This paper presents an analysis of the impact of ground heat regeneration on the efficiency of a ground source heat pump (GSHP) system in a residential building located in Wrocław, Poland. Based on a dynamic energy model developed in TAS EDSL [1] and a borehole heat exchanger simulation using Earth Energy Designer [2], two system variants were compared: one with passive cooling (free-cooling) and other without passive cooling. The results show that regeneration of ground heat exchanger during the summer allows for higher brine inlet temperature, stabilized heat pump operation, and improved seasonal performance factor ($SCOP_{on}$). Passive cooling also enhances indoor thermal comfort at a relatively low energy cost. The study confirms the importance of designing GSHP systems with integrated summer regeneration as a means to improve long-term energy efficiency and environmental performance. *Key words:* ground source heat pump, ground heat exchanger, free-cooling, passive cooling, EDSL TAS, Earth Energy Designer

Wstęp

Charakterystyka energetyczna budynków stanowi istotny obszar badań w dążeniu do ograniczenia zużycia energii i osiągnięcia standardu budynków zero-energetycznych. Realizacja tego celu opiera się na zaostrzeniu wymagań budowlanych w zakresie właściwości materiałów i komponentów oraz zwiększaniu udziału odnawialnych źródeł energii. Raporty dotyczące światowego zużycia energii wskazują trzy główne sektory jej konsumpcji: przemysł, transport i budownictwo [3]. W krajach europejskich sektor

budownictwa odpowiada za około 26,3% końcowego zużycia energii, co stanowi znaczącą część bilansu energetycznego [4]. Efektywne wykorzystanie lokalnie dostępnych zasobów odnawialnych przyczynia się do redukcji energochłonności budynków. Wybór technologii budowy i systemów grzewczych powinien być dostosowany do warunków klimatycznych i dostępności zasobów [5]. W pierwszej kolejności należy uwzględnić pasywne rozwiązania ograniczające zapotrzebowanie na energię, a następnie pełne wykorzystanie odnawialnych źródeł [6]. Pompy ciepła mogą pokrywać zapo-

trzebowanie na chłód (chłodzenie budynków) i ciepło (ogrzewanie budynków i przygotowanie ciepłej wody) w ciągu całego roku. Ich moc cieplna, zależna od zmiennych obciążeń sezonowych, stanowi kluczowy element projektowania i analizy efektywności systemów [7].

Gruntowe pompy ciepła (GPC) są jedną z technologii niskoemisyjnych wykorzystywanych do ogrzewania i chłodzenia [8]. Efektywność działania GPC zależy przede wszystkim od prawidłowego zaprojektowania systemu, co potwierdzają liczne badania wskazujące, że błędy projektowe prowadzą do zmniejszenia

dr inż. Agnieszka Chmielewska, <https://orcid.org/0000-0002-8362-5035>, dr inż. Ewelina Stefanowicz, <https://orcid.org/0000-0001-9216-9046>, mgr inż. Julia Sawicka – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska
Adres do korespondencji/ Corresponding author: agnieszka.chmielewska@pwr.edu.pl

efektywności, wzrostu kosztów eksploatacji, a często także do awarii urządzeń. Przedstawiona w publikacji [9] analiza układu zasilanego gruntową pompą ciepła w obiekcie szkolnym wykazała, że nieprawidłowe określenie zapotrzebowania na moc cieplną oraz energię do zasilania układu, brak szczegółowych danych dotyczących intensywności przekazywania ciepła w gruncie i inne błędy projektowe doprowadziły do poważnych problemów eksploatacyjnych. Długoterminowa eksploatacja konwencjonalnych systemów GPC, szczególnie w klimacie zdominowanym przez zapotrzebowanie na ciepło, może powodować stopniowe wychładzanie gruntu, stan tzw. nierównowagi cieplnej, co skutkuje postępującym obniżeniem temperatury czynnika roboczego i spadkiem współczynnika sezonowej efektywności oraz ogólnej wydajności systemu [10, 11]. Przedstawione w pracy [12] badania wykazały wyraźny spadek temperatury glikolu (cieczy odbierającej ciepło z dolnego źródła) w kolejnych latach eksploatacji. W związku z tym coraz większe znaczenie zyskują metody regeneracji gruntu polegające na sezonowym lub całorocznym dostarczaniu ciepła, np. z konwersji energii słonecznej [10]. Proces doprowadzenia ciepła do gruntu może być skojarzony z aktywnym lub pasywnym chłodzeniem budynku, bądź zintegrowany z innymi systemami OZE np. z kolektorami słonecznymi, ogniwami PVT lub źródłami ciepła odpadowego [13]. We wszystkich rozwiązaniach, integracja gruntowego wymiennika ciepła z układem pozwalającym na jego regenerację ma na celu utrzymanie stabilności temperatury dolnego źródła, a tym samym wysokiej efektywności działania pompy ciepła w okresie wieloletnim.

Są prowadzone liczne prace badawcze nad efektywnością instalacji grunto- wych pomp ciepła, obejmujące zarówno badania intensywności dopływu ciepła z gruntowego wymiennika ciepła, jak i wpływu regeneracji na wieloletnią efektywność systemu [14, 15]. Badania dotyczą m.in. konstrukcji wymiennika, profilu obciążenia oraz sposobu magazynowania energii. Analizy numeryczne przedstawione w publikacji [16] wykazały, że integracja GPC z panelami PVT zwiększa współczynnik SPF (Seasonal Performance Factor) o 6,3% w przypadku pojedynczej sondy U-kształtnej i o 2,8% dla podwójnej, redukując emisję CO₂ odpowiednio o 7,1% i 3,8%. Inne badania [17] wykazały, że wykorzystanie płyt- kich odwiertów jako sezonowego magazynu energii termicznej pozwala nie tylko pokrywać zapotrzebowanie na ciepło zimą, ale rów-

niez ograniczyć zjawisko nierównowagi cieplnej gruntu, poprawiając jego temperaturę średnioroczną o ok. 2,1K po 19 miesiącach funkcjonowania systemu. W układach hybrydowych PVT-GPC w klimacie zimnym regeneracja gruntu podnosi temperaturę dolnego źródła o 2,6K i współczynnik SPF o 15,5%, umożliwiając jednocześnie zmniejszenie głębokości odwiertów bez spadku doprowadzonej mocy cieplnej [18]. Ograniczeniem stopnia regeneracji wykorzystującej ciepło z kolektorów słonecznych lub PVT jest dostępna powierzchnia montażowa. W instalacji w Zurychu pełna regeneracja wymagała powierzchni ok. 1,8 m²/MWh przy PVT i 1,2 m²/MWh przy kolektorach płaskich, co stanowiło istotny problem w obiektach zlokalizowanych w gęstej zabudowie miejskiej [19].

W publikacji przeglądowej badacze klasyfikują trzy rodzaje regeneracji gruntu [20] – naturalną, naturalną wzmocnianą oraz sztuczną. Na regenerację naturalną wpływają m.in. przepływ wody grunto- wej, litologia i warunki atmosferyczne [11, 21, 22]. Proces ten jest powolny, ale jego efektywność można zwiększyć m.in. poprzez odpowiednią geometrię i sposób eksploatacji odwiertów, w tym zwiększenie odległości między nimi oraz ich optymalne rozmieszczenie na działce. Badania wykazały, że układy liniowe oraz L- kształtne są bardziej wrażliwe na prędkość i przepływ wody grunto- wej niż układy prostokątne [23]. W metodach sztucznej regeneracji decydujący jest bilans strumieni ciepła. Aktywna regeneracja gruntu jest szczególnie ważna w klimacie zdominowanym przez potrzeby grzewcze [24]. W literaturze zagadnienia związane z magazynowaniem ciepła oraz regeneracją gruntu są zwykle wyraźnie oddzielone. Układ BTES działa w warunkach temperatury bardziej różniące się od niezakłóconej temperatury gruntu. Niska sprawność i wysokie koszty instalacji stanowią główne bariery rozwoju systemów BTES, podczas gdy niskie koszty operacyjne stanowią ich główną zaletę [25].

W kontekście rosnących obciążeń chłodniczych budynków oraz konieczności ograniczania zużycia energii pierwotnej przy projektowaniu dolnego źródła ciepła istotnym zagadnieniem staje się uwzględnienie jego sezonowej regeneracji. Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu regeneracji gruntu poprzez chłodzenie pasywne na długoterminową efektywność energetyczną systemu z gruntową pompą ciepła. Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem dynamicznego modelu energetycznego budynku w środowisku TAS EDSL oraz modelu wymiennika gruntowego w programie Earth Energy Designer. Pozwoliło to na opracowanie szczegółowych profili zapotrzebowania na energię budynku oraz obciążenia górotworu w wariantach z i bez regeneracji gruntu, a także na wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych układu w ujęciu wieloletnim.

Opis badań

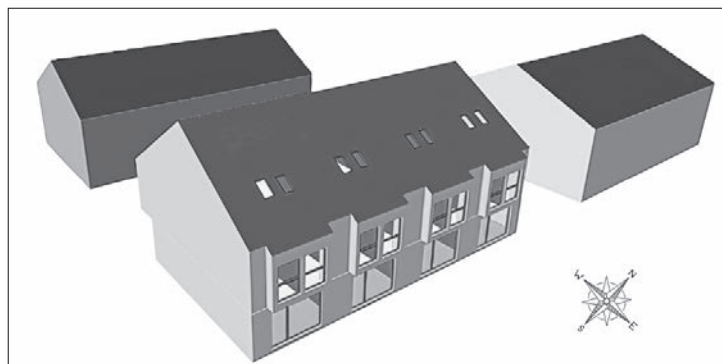
Opis budynku

Analizie poddano budynek wielorodzinny z czterema lokalami mieszkalnymi (dwa lokale typu A – zewnętrzne oraz dwa lokale typu B – wewnętrzne) zlokalizowany we Wrocławiu. Model geometryczny budynku przedstawiono na rysunku 1. Powierzchnia ogrzewana każdego lokalu to 205,3 m², a kubatura 501,5 m³. Sąsiednie budynki uwzględniono jedynie pod kątem wpływu zacienienia i bilansu zysków słonecznych.

Program EDSL TAS wykorzystuje niestacjonarny model wymiany ciepła w przegrodach z uwzględnieniem ich wielowarstwowej konstrukcji. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie akumulacji cieplnej materiałów, a także efektów tłumienia amplitudy i przesunięcia fazowego zmian temperatury. Program bilansuje jednocześnie przewodzenie, promieniowanie i konwekcję, co pozwala uzyskać realistyczne odwzorowanie procesów cieplnych zachodzących w budynku w kroku godzinowym.

Obliczenia bilansów energii w każdej strefie przeprowadzono przy założeniu

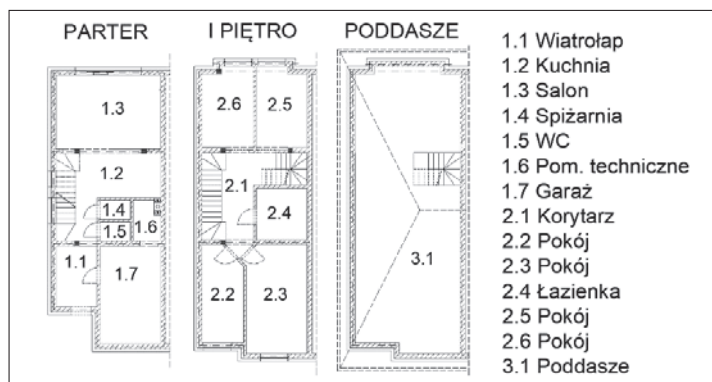
Rysunek 1. Model geometryczny budynku wielorodzinnego; Geometric model of a multi-family building



w sezonie grzewczym temperatury 20°C w pomieszczeniach mieszkalnych i 24°C w łazienkach, a latem w wariantcie z chłodzeniem maksymalnie 26°C. Garaże i pomieszczenia techniczne były niechłodzone latem i ogrzewane zimą do 5°C. Budynek posiada wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła w części mieszkalnej i wentylację grawitacyjną w garażu. Każdy z lokali ma podobny układ funkcjonalny, który przedstawiono na rysunku 2.

Zyski wewnętrzne określono zgodnie z PN-EN ISO 13790 [26], uwzględniając harmonogram obecności użytkowników, działanie urządzeń oraz normowe wartości strumienia ciepła od osób, oświetlenia

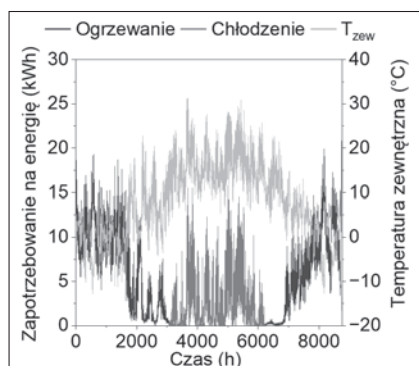
Na rysunku 4 przedstawiono zapotrzebowanie na ciepło użytkowe do przygotowania c.w. obliczone w interwale 1 godziny w podstawie modelu z pracy [28], uwzględniającego dobową zmienność zapotrzebowania i wpływ temperatury wody zimnej, wyznaczonej z danych klimatycznych i charakterystyki lokalnego wodociągu. Średnie dobowe zużycie wody w każdym lokalu przyjęto jako 0,21 m³, a rozkład godzinowy zgodnie z typowym profilem użytkownika [28]. W okresie zimowym maksymalne zapotrzebowanie na energię budynku na ten cel wynosi 4,71 kWh/dobę, a w sierpniu spada do 2,6 kWh/dobę, co wynika z wyższej temperatury



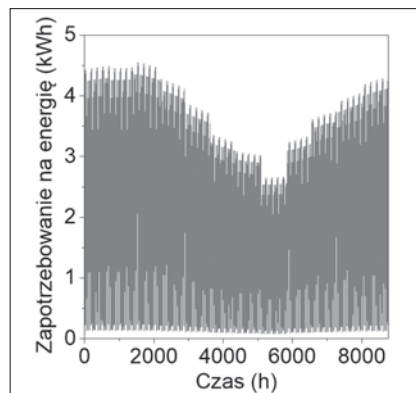
Rysunek 2. Układ funkcjonalny lokalu typu A: rzuty parteru, I piętra oraz poddasza; Functional layout of the premises type A: ground floor, first floor, and attic plans

i sprzętu, odniesione do powierzchni użytkowej. W modelu uwzględniono także ruchome rolety zewnętrzne, aktywowane przy natężeniu promieniowania słonecznego powyżej 300 W/m² latem i 500 W/m² zimą.

Obliczone godzinowe zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i chłodzenia przedstawiono na rysunku 3. Profil wykazuje typową sezonowość klimatyczną, a roczne zapotrzebowanie na energię na poszczególne cele wynosi odpowiednio 35 181 kWh do ogrzewania i 8 925 kWh do chłodzenia. Projektowe obciążenie cieplne budynku wg PN-EN 12831 to 26,1 kW [27].



Rysunek 3. Zapotrzebowanie na energię użytkową budynku na cele ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń; Useful energy demand of the building for space heating and cooling



Rysunek 4. Zapotrzebowanie na energię użytkową budynku na cele ciepłej wody; Useful energy demand of the building for domestic hot water

Opis instalacji

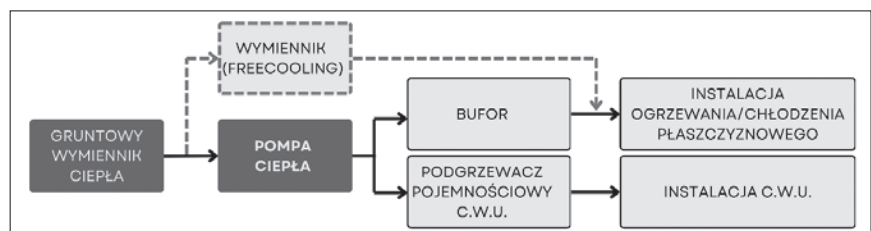
W budynku przyjęto instalację grzewczą zasilaną grunтовą pompą ciepła typu glikol-woda, współpracującą z niskotemperaturowym systemem ogrzewania i chłodzenia płaszczynowego. Źródło ciepła działa w układzie z buforem, pełniącym funkcję sprzęgła hydraulicznego oraz stabilizatora temperatury zasilającej instalację. Zbiornik buforowy gromadzi nadmiar ciepła wytworzonego przez pompę ciepła, ograniczając czas działania sprężarki. Temperatura zasilania w obiegu grzewczym jest regulowana zgodnie z krzywą grzewczą w funkcji aktualnej temperatury zewnętrznej i utrzymywana za pomocą zaworu trójdrogowego mieszającego. Charakterystyczne wartości mocy cieplnej oraz COP pompy ciepła przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Moc grzewcza oraz współczynnik COP analizowanej pompy ciepła w wybranych punktach pracy (B – temperatura dolnego źródła w °C, W – temperatura wody grzewczej w °C); Heating capacity and COP of the analyzed heat pump at selected operating points (B – temperature of the heat source in °C, W – temperature of the heating water in °C)

Moc grzewcza/ COP	W45	W55
B-5	29,3 kW/3,3	26,5 kW/2,6
B0	33,1 kW/3,7	32,1 kW/3,0
B10	43,9 kW/4,8	41,8 kW/3,8

Na rysunku 5 przedstawiono uproszczony schemat instalacji zastosowanej w analizowanym budynku.

Analiza oparta wyłącznie na wielkości energii użytkowej może prowadzić do niedoszacowania długości grunтового wymiennika, co może w eksploatacji spowodować spadek temperatury gruntu poniżej dopuszczalnych wartości, uniemożliwiających osiągnięcie właściwej temperatury parowania czynnika chłodniczego [29, 30]. Zgodnie z Rozporządzeniem [31] przyjęto sprawności przesyłu, akumulacji i regulacji ciepła. Całkowita wartość tych sprawności wynosi dla instalacji



Rysunek 5. Schemat ideowy instalacji; Schematic diagram of the installation

wody zimnej i mniejszego zużycia c.w. Profil zużycia ciepła na potrzeby przygotowania ciepłej wody przedstawiono na rysunku 4. Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową na ten cel wynosi 15 499 kWh.

ogrzewania 85%, c.w. 51%, chłodu 90%. Uwzględniając straty ciepła w instalacjach, wyznaczono zapotrzebowanie na ciepło przekazywane w skraplaczu, które wynosi odpowiednio: 41 390 kWh dla

ogrzewania, 30 390 kWh dla c.w. oraz 9 900 kWh dla chłodzenia.

Analizę działania pompy ciepła sporządzono w kroku godzinowym. W układzie przyjęto priorytet c.w., polegający na odłączeniu obiegu ogrzewania przy podgrzewaniu wody. Latem aktywowane jest chłodzenie pasywne (free-cooling), w którym nadmiar ciepła odprowadzany jest do gruntu z pominięciem sprężarki.

Profil obciążenia górotworu (rysunek 6) sporządzono w warunkach projekto-

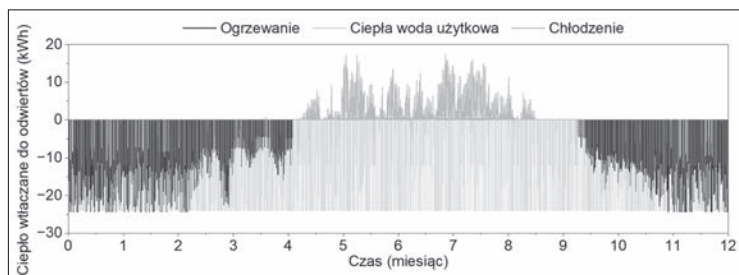
wielkości gruntowego wymiennika ciepła odbywa się zwykle na podstawie ustalenia jednostkowej mocy cieplnej GWC, która jest zależna bezpośrednio od parametrów gruntu. W przypadku instalacji o mocy grzewczej do 30 kW przeważnie nie wykonuje się pomiarów terenowych pozwalających na wyznaczenie efektywnej przewodności cieplnej oraz oporu cieplnego odwiertu nazywanych testem reakcji termicznej. Celem niniejszej analizy jest ocena profilu średniej temperatury gli-

tak, by na przestrzeni lat temperatura glikolu nie spadła poniżej -2°C .

Na podstawie mocy chłodniczej gruntowej pompy ciepła ustalono wielkość gruntowego wymiennika ciepła. Określono jednostkowy strumień ciepła z gruntu wynoszący 40 W/mb [32]. Przy tych założeniach (wariant – W0) wymagana długość całkowita gruntowego wymiennika ciepła określona na podstawie mocy chłodniczej pompy ciepła ($Q_{\text{CH}} = 24.2\text{ kW}$) wynosi 600 m [32]. W tym wariantcie przyjęto 6 odwiertów po 100 m każdy, ułożone w linii, w odległości 10 m od siebie.

Analizy wykonano w oprogramowaniu Earth Energy Designer [2]. W niniejszej analizie wykorzystano godzinowe profile obciążenia budynku na cele grzewcze i przygotowania ciepłej wody.

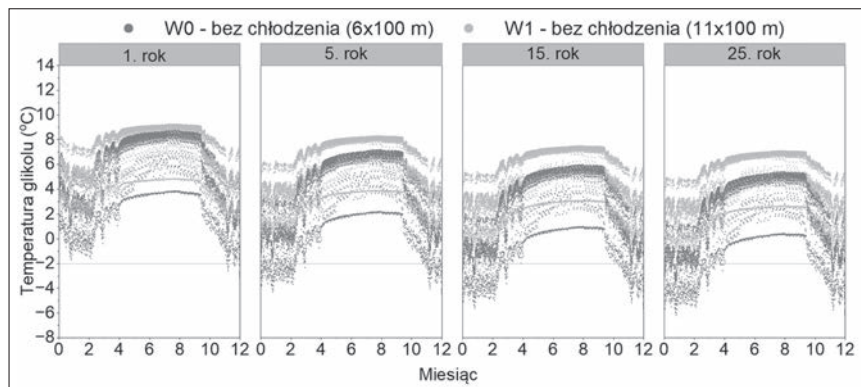
Jak można zauważyć na rysunku 7, w wariantcie W0, w którym długość gruntowego wymiennika ciepła została wy-



Rysunek 6. Obciążenie górotworu; Borehole heat load

wych do ogrzewania B0/W45, przygotowania ciepłej wody B0/W55 oraz bezpośredniego chłodzenia. Analiza obejmowała zarówno cykle ładowania zasobnika buforowego oraz podgrzewacza ciepłej wody, jak i okresy przerw w pracy pompy ciepła, wynikające z chwilowego pokrycia zapotrzebowania cieplnego budynku energią zgromadzoną w zbiornikach. Analizy wykonano dla dwóch wariantów z oraz bez uwzględnienia chłodzenia, zakładając, że wyznaczenie wymaganej długości gruntowego wymiennika ciepła powinno zostać wykonane bez uwzględnienia jego regeneracji.

Analiza została przeprowadzona w warunkach geologicznych i klimatycznych odpowiadających lokalizacji budynku, przy założeniu pionowego wymiennika ciepła w postaci sondy U-kształtnej, zainstalowanej w złożu gruntowym. Parametry instalacji dolnego źródła przedstawiono w tabeli 2. Podstawowy dobór



Rysunek 7. Profil średniej temperatury glikolu w kolejnych latach eksploatacji – wariant bez obciążenia chłodniczego; Average glycol temperature profile in subsequent years of operation – variant without cooling load.

kolu na przestrzeni 25 lat eksploatacji GWC dla wariantu, w którym wymiennik został zwymiarowany na podstawie jednostkowej, teoretycznej mocy cieplnej oraz w wariantcie drugim, w którym przeprowadzono optymalizację jego wielkości

znaczona na podstawie obciążenia grzewczego budynku i jednostkowej mocy cieplnej, średnia temperatura glikolu spada poniżej wartości granicznej już w drugim roku eksploatacji. „Przeciążenie” termiczne gruntu powoduje jego wychłodzenie wokół wymiennika i wpływa na efektywność działania pompy ciepła. W konsekwencji temperatura na wejściu do pompy ciepła może wykraczać poza obszar prawidłowego działania urządzenia (tzw. „koperty” na wykresie). Wyniki symulacji wykazały, że utrzymanie średniej temperatury glikolu w wymaganym przedziale wymagałoby instalacji z 11 odwiertami o tej samej głębokości. Ta konfiguracja została przyjęta do dalszych analiz.

Wyniki symulacji

Przy określonej wielkości wymiennika dolnego źródła, dobranej na podstawie

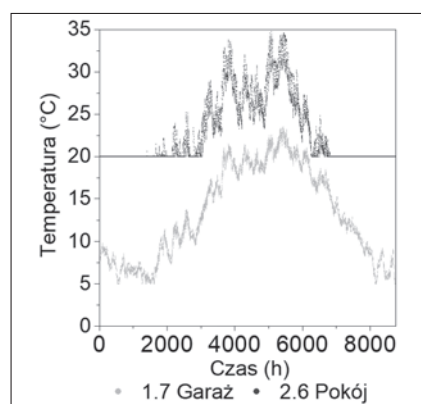
Tabela 2. Parametry gruntowego wymiennika ciepła; Parameters of the ground heat exchanger

Symbol	Nazwa	Wartość	Jednostka
Właściwości ośrodka gruntowego			
λ_g	Przewodność cieplna gruntu, wyznaczona na podstawie profilu geologicznego	2,0	W/(m·K)
C_g	Średnia objętościowa pojemność cieplna ośrodka gruntowego	1,900	MJ/(m ³ ·K)
q_g	Geotermalny strumień ciepła	0,06	W/m ²
$t_{p,g}$	Temperatura na powierzchni gruntu	8,3	°C
Odwiert i wymiennik ciepła			
-	Typ wymiennika	U-rura (40x3,7)	-
d_{odw}	Średnica odwiertów	150	mm
V_{gl}	Strumień objętości glikolu	7,0	m ³ /h
λ_r	Współczynnik przewodzenia ciepła U-rury	0,42	W/(m·K)
Nośnik ciepła: Roztwór glikolu propylenowego 30%			
λ_p	Współczynnik przewodzenia ciepła	0,447	W/(m·K)
C_p	Ciepło właściwe	3770	J/(kg·K)
ρ_p	Gęstość	1052	kg/m ³
μ_p	Dynamiczny współczynnik lepkości	0,0047	kg/(m·s)

warunków obciążenia górotworu, przeprowadzono obliczenia w wariantcie z pasywnym chłodzeniem oraz bez pasywnego chłodzenia. Dodatkowo oceniono możliwość zastosowania chłodzenia pasywnego w analizowanym budynku.

Układ bez chłodzenia pasywnego

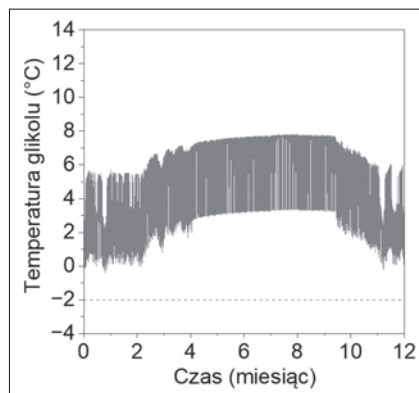
Profil temperatury wewnętrznej pomieszczeń, w których osiągała ona najwyższe oraz najniższe wartości przedstawiono na rysunku 8. W pozostałych pomieszczeniach o tym samym przeznaczeniu profil temperatury wykazuje zbliżony charakter. Pomieszczeniem o najwyższej temperaturze wewnętrznej jest pokój 2.6. Z wykresu wynika, że w miesiącach letnich temperatura powietrza w tym pomieszczeniu osiąga wartość niemal 35°C, co prowadzi do przegrzewania wnętrza i może obniżyć komfort użytkownika przestrzeni mieszkalnej. Pomieszczeniem charakteryzującym się najniższą temperaturą wewnętrzną w ciągu całego roku jest garaż, w którym wartość projektowej temperatury wewnętrznej wynosiła 5°C. W tym pomieszczeniu system grzewczy aktywował się jedynie w nielicznych, najchłodniejszych godzinach roku. Ze względu na duży udział przeszklenia oraz lokalizację w bryle budynku obciążony jest on dużymi zyskami od promieniowania słonecznego.



Rysunek 8. Temperatury wewnętrzne w pomieszczeniach dla lokalu typu A – wariant bez chłodzenia; Indoor temperatures in rooms of unit type A – variant without cooling

Przeprowadzono ocenę pracy dolnego źródła ciepła w analizowanym wariantcie systemu bez regeneracji. Do obliczeń przyjęto dane wynikające z obciążenia grzewczego budynku oraz zapotrzebowania na ciepłą wodę z uwzględnieniem strat ciepła. Obliczenia wykonano w okresie 25 lat przyszłej eksploatacji.

Na rysunku 9. przedstawiono przebieg średniej temperatury płynu roboczego w 10. roku eksploatacji. Prawidłowo zaprojektowane dolne źródło pompy cie-

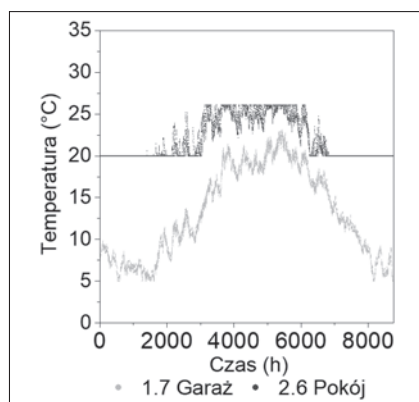


Rysunek 9. Profil średniej temperatury glikolu w 10. roku eksploatacji – wariant bez chłodzenia; Average glycol temperature profile in the 10th year of operation – variant without cooling

pła regeneruje się w okresie letnim w sposób naturalny, gdy pracuje tylko pod obciążeniem związanym z przygotowaniem ciepłej wody. Widoczny jest wzrost temperatury glikolu przed kolejnym sezonem grzewczym.

Układ z chłodzeniem pasywnym

W kolejnym wariantcie analizowano układ, który umożliwia również pasywne chłodzenie pomieszczeń w okresie letnim. W tym rozwiązaniu źródłem chłodu jest grunt o niskiej temperaturze, a do instalacji dolnego źródła ciepło z pomieszczeń przekazywane jest za pomocą niezależnego obiegu hydraulicznego. Na rysunku 10. przedstawiono profil oczekiwanej temperatury wewnętrznej w wybranych pomieszczeniach. Profil ten został wykorzystany do określenia zapotrzebowania budynku na energię chłodniczą niezbędną do zapewnienia temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach nieprzekraczającej w okresie letnim 26°C. Najniższą temperaturę, podobnie jak w poprzednim wariantcie, odnotowano w garażu, jednak różnica względem układu bez chłodzenia

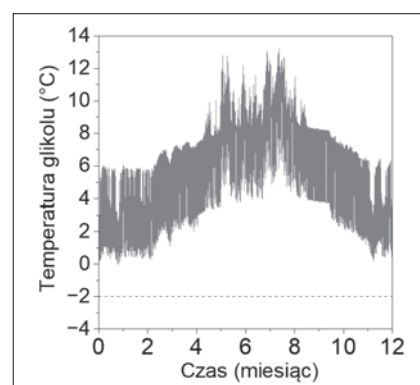


Rysunek 10. Temperatury wewnętrzne w pomieszczeniach dla lokalu typu A – wariant z chłodzeniem; Indoor temperatures in rooms of unit type A – variant with cooling

jest marginalna. Najbardziej podatnym na przegrzewanie pomieszczeniem pozostaje pokój 2.6 i on charakteryzuje się najwyższym jednostkowym zapotrzebowaniem na energię chłodniczą.

Do obliczeń przyjęto charakterystyki obciążenia cieplnego budynku oraz zapotrzebowanie na ciepłą wodę, jak również godzinowe obciążenia chłodnicze. Symulacje wykonano w 25-letnim okresie eksploatacji, z uwzględnieniem rocznego cyklu działania pompy ciepła oraz przepływu ciepła między gruntem a budynkiem w sezonie letnim.

W analizowanym wariantcie układ chłodzenia pasywnego umożliwia częściową regenerację dolnego źródła ciepła poprzez sezonowe dostarczanie ciepła do gruntu. Na rysunku 11. przedstawiono

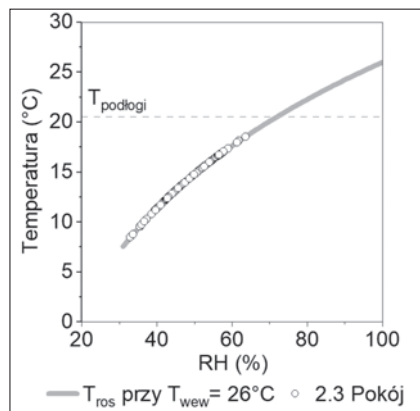


Rysunek 11. Profil średniej temperatury glikolu w 10. roku eksploatacji – wariant z chłodzeniem; Average glycol temperature profile in the 10th year of operation – variant with cooling

przebieg średniej temperatury glikolu w 10. roku eksploatacji instalacji z chłodzeniem pasywnym. Widoczny jest wyraźny wzrost temperatury glikolu w okresie letnim, osiągający chwilowo wartość maksymalną około 13°C. Układ ten pozwala również na osiągnięcie nieco wyższej temperatury glikolu w okresie przejściowym i na początku sezonu grzewczego.

Uwzględnienie chłodzenia pasywnego w lecie nie tylko poprawia komfort cieplny użytkowników, ale również wpływa korzystnie na warunki funkcjonowania pompy ciepła zimą, dzięki częściowej regeneracji dolnego źródła. W praktyce projektowej, nawet w przypadku niewielkich obiektów, integracja funkcji chłodzenia z gruntowym wymiennikiem ciepła poprawia efektywność całej instalacji.

W celu oceny możliwości zastosowania chłodzenia płaszczyznowego wykorzystano wyniki symulacji energetycznej budynku wykonanej w oprogramowaniu TAS Building Simulator, uwzględniającej zmienność temperatury i wilgotności



Rysunek 12. Wartości wilgotności względnej (RH) oraz odpowiadające im wartości punktu rosy w pomieszczeniu 2.3; Relative humidity (RH) values and the corresponding dew point values in room 2.3

względnej w pomieszczeniach. Na podstawie danych godzinowych wyznaczono wartość punktu rosy z wykorzystaniem algorytmu Magnusa–Tetensa [33].

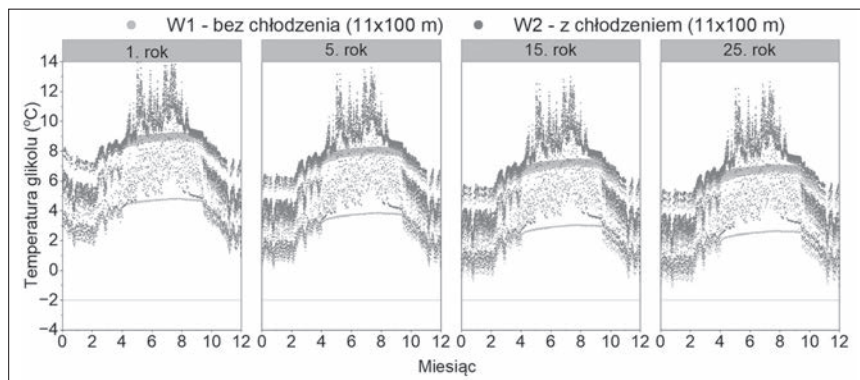
Stwierdzono, że najwyższa wartość wilgotności względnej występuje w pomieszczeniu 2.3, (63,6%, rysunek 12). Przy tej wartości, przy założonej temperaturze wewnętrznej, punkt rosy wyniósł 18,5°C. W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji systemu chłodzenia płaszczyznowego oraz uniknięcia wykraplania pary wodnej na powierzchni posadzki, przyjęto temperaturę czynnika chłodzącego o 2 K wyższą. W konsekwencji określono, że minimalna temperatura powierzchni podłogi chłodzącej nie powinna być niższa niż 20,5°C.

W oparciu o powyższe założenia obliczeniowa jednostkowa moc chłodnicza wynosi 38,5 W/m² [34]. Uzyskana wartość jest wystarczająca do pokrycia zapotrzebowania na chłód w analizowanym budynku.

Podsumowanie i dyskusja wyników

Przeprowadzone symulacje wskazują, że choć pasywne chłodzenie nie zapewnia pełnej regeneracji gruntu, to jednak znacząco ogranicza efekt postępującego wychłodzenia dolnego źródła, co w dłuższym okresie przekłada się na wyższy sezonowy współczynnik efektywności pompy ciepła (SCOP).

Na rysunku 13. przedstawiono długoterminowy przebieg średniej temperatury glikolu w gruntowym wymienniku ciepła w dwóch wariantach działania systemu: W1 – bez chłodzenia oraz W2 – z chłodzeniem, przy identycznej konfiguracji odwiertów (11 × 100 m). Wyraźnie widoczna jest odmienna sezonowa zmienność tem-



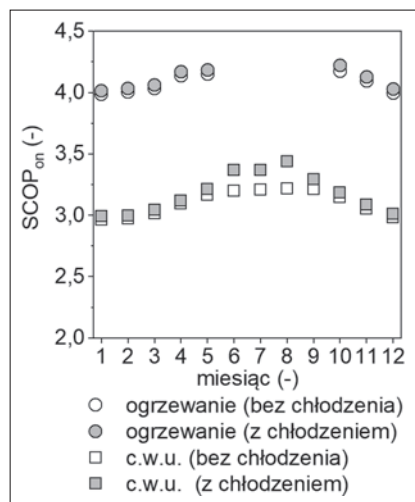
Rysunek 13. Profil średniej temperatury glikolu dla instalacji – warianty z i bez obciążenia chłodniczego; Average glycol temperature profile for the installation – variants with and without cooling load

peratury czynnika roboczego oraz znaczący wpływ na działanie instalacji. W układzie bez chłodzenia jest obserwowany systematyczny spadek średniej rocznej temperatury gruntu wokół sondy, co prowadzi do obniżenia sezonowego współczynnika efektywności pompy ciepła w dłuższej perspektywie czasowej. W układzie z pasywnym chłodzeniem obserwuje się spowolnienie tempa spadku średniej rocznej temperatury gruntu wokół sond pionowych.

Analiza długoterminowa wykazała, że średnia temperatura gruntu w układzie z chłodzeniem pasywnym jest wyższa w okresie 25 lat eksploatacji średnio o 16% w porównaniu z układem bez chłodzenia. Już w pierwszym roku symulacji wzrost średniej temperatury dolnego źródła wynosi około 7%. W ostatnim roku analizy (25 rok) różnica ta wzrosła do 21%.

Wzrost średniorocznej temperatury glikolu przekłada się na poprawę warunków działania pompy ciepła w sezonie grzewczym, ograniczając spadek efektywności wynikający z obniżenia temperatury dolnego źródła.

Współczynnik SCOP_{on} wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 14825 [35] jako stosunek zapotrzebowania grzewczego budynku do energii elektrycznej pobranej przez sprężarkę pompy ciepła. Na podstawie danych przedstawionych na wykresie 14. stwierdzono, że miesięczne wartości współczynnika efektywności pompy ciepła SCOP_{on} do przygotowania ciepłej wody są wyższe w wariantach z regeneracją dolnego źródła, szczególnie w miesiącach letnich. W analizowanym okresie od maja do września średnia różnica sezonowego współczynnika SCOP_{on} przy przygotowaniu c.w. wyniosła około 4%, przy czym w sierpniu osiągnęła wartość 8%. W ujęciu chwilowym współczynnik COP przy przygotowaniu c.w. wzrósł nawet o 14%, co potwierdza, że regeneracja dolnego źródła poprawia efektywność działania pompy ciepła latem, ogra-



Rysunek 14. Miesięczne wartości współczynnika efektywności SCOP_{on} dla przygotowania ciepłej wody oraz ogrzewania w 10. roku eksploatacji dla układu z chłodzeniem pasywnym (z regeneracją gruntu) oraz bez chłodzenia; Monthly values of the coefficient of performance (SCOP) for domestic hot water preparation and space heating in the 10th year of operation for the system with passive cooling (with ground regeneration) and without cooling

niczając zużycie energii elektrycznej. W odniesieniu do ogrzewania zaobserwowano poprawę sezonowego współczynnika SCOP_{on} w miesiącach przejściowych, zwłaszcza na początku sezonu grzewczego (październik–listopad).

Wnioski

Prawidłowe wymiarowanie dolnego źródła gruntowej pompy ciepła ma kluczowe znaczenie dla jej długotrwałego i efektywnego funkcjonowania. Oprócz operowania wyłącznie jednostkową liniową gęstością strumienia ciepła wymiennika powinno się uwzględniać także obciążenie energetyczne górotworu oraz rosnący udział w bilansie budynku potrzeb przygotowania ciepłej wody, który w budynkach o niskim zużyciu energii i zero-energetycznych może

przewyższać zapotrzebowanie na ogrzewanie.

Symulacje wykazały, że chłodzenie pasywne pełni podwójną rolę, ponieważ poprawia komfort cieplny i jednocześnie regeneruje dolne źródło pompy ciepła. Już w pierwszym roku eksploatacji układu z chłodzeniem średnia temperatura gruntu wzrosła o około 7%, a po 25 latach różnica względem układu bez chłodzenia sięgnęła 21%. Przełożyło się to na poprawę efektywności pompy ciepła, szczególnie w zakresie przygotowania ciepłej wody. W okresie letnim sezonowy współczynnik efektywności ($SCOP_{on}$) był wyższy średnio o 4%, a chwilowy współczynnik (COP) osiągnął wzrosty do 14%. W przypadku ogrzewania największy przyrost sezonowego współczynnika efektywności pompy ciepła zaobserwowano na początku sezonu grzewczego, co wynikało z wyższej temperatury dolnego źródła po letniej regeneracji.

Pozytywny wpływ chłodzenia pasywnego był widoczny mimo niskiego udziału obciążenia chłodniczego w bilansie analizowanego budynku. Wskazuje to na jeszcze większe znaczenie tego rozwiązania w obiektach o zrównoważonym profilu ciepło-chłodniczym bądź charakteryzujących się przewagą obciążeń chłodniczych, takich jak biurowce lub budynki usługowe. Integracja funkcji free-cooling z gruntem pompy ciepła sprzyja stabilizacji warunków działania, ograniczeniu zużycia energii elektrycznej oraz poprawie efektywności energetycznej i trwałości całego układu, co uzasadnia stosowanie tego rozwiązania w nowoczesnym budownictwie.

LITERATURA

[1] "EDSL TAS." Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.edsl.net/>

[2] T. Blomberg, J. Claesson, G. Hellström, and B. Sanner, "Software within building physics and ground heat storage BLOCON EED v3.2 Earth Energy Designer," 2015. [Online]. Available: www.buildingphysics.com

[3] L. Belussi et al., "A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions," *Journal of Building Engineering*, vol. 25, p. 100772, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100772.

[4] " – Statistics Explained – Eurostat." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview

[5] J. Kosmowski, K. Zwarycz-Makles, and K. Kurtz-Orecka, "Analiza gospodarki obiegu zamkniętego jako element projektowania budynków zrównoważonych ze środowiskiem Circular economy analysis as an element of environmentally sustainable building design," *Instal*, vol. 1, pp. 12–17, 2023, doi: 10.36119/15.2023.1.2.

[6] R. Wang, W. Feng, L. Wang, and S. Lu, "A comprehensive evaluation of zero energy buildings in cold regions: Actual performance and key technologies of cases from China, the US, and the European Union," *Energy*, vol. 215, p. 118992, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118992.

[7] S. M. Hosseinnia and M. Sorin, "Energy targeting approach for optimum solar assisted gro-

und source heat pump integration in buildings," *Energy*, vol. 248, p. 123528, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123528.

[8] R. A. Sakowicz and A. Justyna Werner-Juszczak, "Operating costs of air and ground source heat pumps," *Instal*, vol. 7–8, pp. 33–37, 2022, doi: 10.36119/15.2022.7-8.4.

[9] S. Kocik and P. Ciuman, "Optimising the operation of the HVAC system with a ground source heat pump in a school building," *Instal*, vol. 2, pp. 28–35, 2024, doi: 10.36119/15.2024.2.3.

[10] N. Fidorów-Kaprawy and Ł. Stefaniak, "Potential of CO₂ Emission Reduction via Application of Geothermal Heat Exchanger and Passive Cooling in Residential Sector under Polish Climatic Conditions," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 22, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15228531.

[11] T. Sliwa and M. A. Rosen, "Natural and artificial methods for regeneration of heat resources for borehole heat exchangers to enhance the sustainability of underground thermal storages: A review," 2015, MDPI. doi: 10.3390/su71013104.

[12] J. Piotrowska-Woroniak, "Assessment of ground regeneration around borehole heat exchangers between heating seasons in cold climates: A case study in białystok (NE, Poland)," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14164793.

[13] S. E. Poulsen, M. Alberdi-Pagola, D. Cerra, and A. Magrini, "An experimental and numerical case study of passive building cooling with foundation pile heat exchangers in Denmark," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 14, 2019, doi: 10.3390/en12142697.

[14] N. Fidorow-Kaprawy and E. Stefanowicz, "Analysis of the power extraction rate change for boreholes in time and in different heat load conditions," *E3S Web of Conferences*, vol. 116, Sep. 2019, doi: 10.1051/E3SCONF/201911600021.

[15] E. Stefanowicz and M. Szulgowska-Zgrzywa, "Energy balancing in ground heat exchanger for heat pump systems – A case study with simulations," *E3S Web of Conferences*, vol. 100, Jun. 2019, doi: 10.1051/E3SCONF/201910000076.

[16] I. Sarbu and A. Dorca, "Investigation by monitoring and numerical simulation of the performance of a ground-source heat pump system with and without regeneration in different configurations and operating modes," *Appl Therm Eng*, vol. 250, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123507.

[17] C. Naranjo-Mendoza, M. A. Oyinlola, A. J. Wright, and R. M. Greenough, "Experimental study of a domestic solar-assisted ground source heat pump with seasonal underground thermal energy storage through shallow boreholes," *Appl Therm Eng*, vol. 162, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114218.

[18] P. Adebayo, R. Shor, A. Mohamad, C. Wemhöner, and A. Mwesigye, "Performance analysis of a solar-assisted ground source heat pump with a single vertical U-tube ground heat exchanger," *Appl Therm Eng*, vol. 257, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124452.

[19] D. Sauter, M. Hunziker, J. Poppei, F. Cochand, M. Hubbuch, and J. Rohrer, "Solar thermal regeneration of borehole heat exchangers in urban and suburban districts," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012094.

[20] X. Kirschstein, M. Ohagen, J. Reber, P. J. Vardon, and N. Bishara, "Regeneration of shallow borehole heat exchanger fields: A literature review," *Energy Build*, vol. 317, p. 114381, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114381.

[21] J. A. Rivera, P. Blum, and P. Bayer, "Ground energy balance for borehole heat exchangers: Vertical fluxes, groundwater and storage," *Renew Energy*, vol. 83, pp. 1341–1351, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.05.051.

[22] P. Hein, O. Kolditz, U. J. Görke, A. Bucher, and H. Shao, "A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems," *Appl Therm Eng*, vol. 100, pp. 421–433, May 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.039.

[23] J. C. Choi, J. Park, and S. R. Lee, "Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays," *Renew Energy*, vol. 52, pp. 230–240, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.028.

[24] D. Chwieduk and M. Chwieduk, "Idea wykorzystania gruntu jako źródła ciepła i sezonowego magazynu," *Instal*, vol. 12, pp. 17–22, 2016.

[25] M. Ahmadfard and M. Bernier, "Simulation of borehole thermal energy storage (BTES) systems using simplified methods," *J Energy Storage*, vol. 73, p. 109240, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.109240.

[26] "PN-EN ISO 13790:2009 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia”,” 2009.

[27] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 12831: Instalacje Ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego. Warszawa, 2006.

[28] A. Chmielewska, "Modelowanie zapotrzebowania na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody w budynkach wielorodzinnych. Raporty Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej," Rozprawa Doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2017.

[29] J. Piotrowska-Woroniak, W. Zaluska, G. Woroniak, "Analiza pracy poziomego gruntowego wymiennika ciepła współpracującego z pompą ciepła typu solanka-woda," *Instal*, vol. 10, pp. 26–32, 2015.

[30] J. Piotrowska-Woroniak, "Badanie rozkładu temperatury w pionowym grunтовым wymienniku ciepła podczas pracy pompy ciepła w północno-wschodniej Polsce," *Instal*, vol. 6, pp. 9–18, 2016.

[31] "Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej," <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150000376>. Accessed: Nov. 14, 2024. [Online].

[32] Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła – PORT PC, "Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła. Część 1 – Dolne źródła do pomp ciepła," vol. 1, Jan. 2013.

[33] M. G. Lawrence, "The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications," *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 86, no. 2, pp. 225–233, Feb. 2005, doi: 10.1175/BAMS-86-2-225.

[34] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN 15377-1 Instalacje ogrzewcze w budynkach – – Wodne płaszczynowe wbudowane systemy ogrzewania i chłodzenia – – Część 1: Obliczanie wydajności cieplnej i chłodniczej. Warszawa: 2008.

[35] Polski Komitet Normalizacyjny, 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. 2022.