

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU WEWNĘTRZNEGO
Z WYKORZYSTANIEM ŹRÓDŁ ŻWIROWYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. ADRIAN SCHWITALLA

PROMOTOR: prof. dr inż. Gerard Jan Besler

Szczególne podziękowania należą się mojemu promotorowi Profesorowi dr inż. Gerardowi Janowi Beslerowi za to, że przez cały czas tworzenia mej pracy nie tylko mnie mobilizował, ale i zawsze służył pomocą, która okazała się nieoceniona.

Pragnę podziękować również dr inż. Magdalenie Budzisz i dr inż. Monice Rdzak za pomoc w realizacji prac badawczych oraz mgr inż. Wojtkowi Kozakowi za pomoc od strony informatycznej a także dr inż. Aleksandrowi Pełechowi za cenne wskazówki w redagowaniu pracy.

Dziękuję także wszystkim innym, którzy mi pomogli, a których tu nie wymieniłem.

Pracę tę poświęcam moim ukochanym:

Kasi i Mai

SPIS TREŚCI

Streszczenie	4
Zestawienie ważniejszych oznaczeń	5
1 Wprowadzenie	8
1.1 Pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych	11
1.1.1 Pozyskiwanie energii gruntu	12
1.2 Magazynowanie energii	17
2 Cel pracy	20
3 Opis przeprowadzonych badań	21
3.1 Badanie regeneracji wymiennika gruntowego powietrzem usuwanym z pomieszczenia	21
3.1.1 Opis stanowiska badawczego	22
3.1.2 Opis badań	24
3.2 Badania magazynowania chłodu w zasobnikach żwirowych	25
3.2.1 Opis stanowisk badawczych oraz przeprowadzonych badań	27
4 Modele matematyczne wymiany ciepła i masy w złożach żwirowych	31
4.1 Model matematyczny wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku	33
4.1.1 Dwufazowy model wymiany ciepła i masy w wymienniku gruntowym ...	36
4.1.2 Algorytm rozwiązania modelu dwufazowego	41
4.2 Dwufazowy model wymiany ciepła i masy w izolowanym złożu żwirowym ...	46
4.3 Model wymiany ciepła w izolowanych złożach żwirowych	49
4.3.1 Algorytm rozwiązania modelu wymiany ciepła	51
5 Weryfikacja modeli matematycznych	54
5.1 Weryfikacja modelu wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku	55
5.2 Weryfikacja modelu wymiany ciepła w izolowanych złożach żwirowych	60
5.2.1 Symulacja pracy złoża nr 1	60
5.2.2 Symulacja pracy złoża nr 2	62
5.3 Porównanie jednofazowego modelu wymiany ciepła i masy oraz nowego modelu wymiany ciepła w izolowanych złożach żwirowych	64
6 Analiza pracy systemów wentylacyjnych z zastosowaniem wymiennika gruntowego oraz izolowanego złoża żwirowego	66
6.1 Analiza obciążenia cieplnego przykładowego pomieszczenia	66
6.2 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego	68
6.2.1 Analiza finansowa układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego	76
6.3 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu	80
6.3.1 Analiza finansowa układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu	87
6.4 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego bez konwencjonalnego układu chłodzenia	88
7 Analiza błędów i niepewności pomiarów	93
8 Podsumowanie	96
9 Bibliografia	98

Streszczenie

W Katedrze Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej od ponad 25 lat prowadzone są badania nad bardzo efektywnym pozyskiwaniem energii cieplnej (także chłodu) w bezprzeponowym gruntowym wymienniku ciepła i masy (BGWCiM) dla celów wentylacji i klimatyzacji. Również nad zastosowaniem żwirowych zasobników do magazynowania energii słonecznej, pozyskiwanej w kolektorach powietrznych.

Dostrzeżono możliwości dalszego zwiększenia efektywności pozyskiwania energii cieplnej, w tym chłodu latem, ze źródeł odnawialnych, a w efekcie istotnego ograniczenia skażenia środowiska poprzez zmniejszenie spalania surowców energetycznych na potrzeby kształtowania mikroklimatu pomieszczeń.

W pracy przedstawiono dwa oryginalne rozwiązania umożliwiające zwiększenie efektywności pozyskiwania oraz magazynowania ciepła i chłodu z zastosowaniem złóż żwirowych.

Dla tych rozwiązań przeprowadzono badania laboratoryjne magazynowania energii cieplnej w złożach żwirowych. Z zastosowaniem modeli matematycznych przeprowadzono analizę energetyczną, a także kosztową. Wykazano, że stosowanie złóż żwirowych w układach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych jest opłacalne.

Opracowano nowy model matematyczny wymiany ciepła w izolowanym złożu żwirowym. Weryfikacja wykazała, że model ten można stosować do analizy pracy złóż żwirowych w różnych układach wentylacyjnych.

Wykazano, że zastosowanie izolowanego złoża żwirowego, jako jedyne źródła chłodu w układzie wentylacyjnym, umożliwia latem wytworzenie i zachowanie korzystnych warunków temperaturowych w pomieszczeniu. W wielu przypadkach można wtedy zrezygnować z zastosowania drogiego układu chłodniczego.

Wdrożenie przedstawionych rozwiązań pozwala na znaczne ograniczenie zużycia energii. Dzięki temu można zmniejszyć zużycie paliw kopalnych, a tym samym ograniczyć zanieczyszczanie środowiska, co jest głównym celem tej pracy.

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

A	- wysokość złoźa	m
a	- dyfuzyjność cieplna	m ² /s
B	- szerokość złoźa	m
c	- ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	J/(kg·K)
D _g (V)	- współczynnik dyfuzji wody w gruncie	m ² /s
D _{wp}	- współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu	m ² /s
d _z	- średnica zastępcza ziarna wypełnienia	m
i	- wskaźnik czasu , t=i·Δt	s
j	- wskaźnik położenia punktu względem osi x, x=j·Δx	m
k	- wskaźnik położenia punktu względem osi y, y=k·Δy	m
L	- długość złoźa	m
L _g	- szerokość warstwy gruntu przyległej do ścian złoźa	m
N _g	- liczba podziałów na odcinki grubości uwzględnianej warstwy przyległej do ścian złoźa	
N _h	- liczba podziałów na odcinki długości złoźa	
p _{wp}	- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu	Pa
p _{wp} (T)	- ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze T	Pa
R	- promień ziarna	m
r	- ciepło parowania wody, zmienna radialna	J/kg, m
T	- temperatura	°C
t	- czas	s
V	- objętościowa zawartość wody w gruncie	m ³ /m ³
V _r (φ)	- objętościowa zawartość wody w gruncie w równowadze z powietrzem o wilgotności względnej φ	m ³ /m ³
W	- wilgotność złoźa	kg/kg
W _{stat}	- zawieszenie statyczne	kg/kg
w	- średnia prędkość w przestrzeni międzyziarnowej	m/s
w ₀	- prędkość pozorna liczona w przekroju brutto złoźa	m/s
X	- zawartość wilgoci w powietrzu	kg/kg
$\bar{X}(T)$	- zawartość wilgoci w powietrzu nasyconym w temperaturze T	kg/kg
x	- kartezyńska zmienna przestrzenna	m
y	- kartezyńska zmienna przestrzenna	m
z	- kartezyńska zmienna przestrzenna	m
D _a	- współczynnik osiowej dyspersji masy	m ² /s

Symbole greckie

α	- współczynnik wnikania ciepła od powietrza do powierzchni ziarna złoża	$W/(m^2 \cdot K)$
β	- współczynnik wnikania masy od powietrza do powierzchni ziarna złoża	$kg/(m^2 \cdot s)$
Δt	- długość kroku czasowego	s
Δx	- długość kroku przestrzennego w kierunku osi x	m
Δy	- długość kroku przestrzennego w kierunku osi y	m
$ \Delta t _{\max}$	- maksymalny moduł różnicy między temperaturą wyznaczoną z modelu a temperaturą zmierzona powietrza opuszczającego wymiennik	$^{\circ}C$
$ \Delta t _{\text{sr}}$	- średni moduł różnicy między temperaturą wyznaczoną z modelu a temperaturą zmierzona powietrza opuszczającego wymiennik	$^{\circ}C$
ε	- porowatość złoża	
φ	- wilgotność względna powietrza	
$\varphi(W)$	- izoterma sorpcji wody na grysie granitowym	
λ	- współczynnik przewodzenia ciepła	$W/(m \cdot K)$
λ_{α}	- współczynnik osiowego dyspersyjnego przenoszenia ciepła w powietrzu	$W/(m \cdot K)$
λ_a^e	- efektywny współczynnik osiowego przewodzenia ciepła złoża	$W/(m \cdot K)$
λ_r^e	- efektywny współczynnik promieniowego przewodzenia ciepła złoża	$W/(m \cdot K)$
λ_0^e	- efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	$W/(m \cdot K)$
ρ	- gęstość	kg/m^3
σ	- powierzchnia właściwa złoża	m^2/m^3

Indeksy dolne

f	- faza płynna
g	- grunt
p	- powietrze
s	- faza stała (wypełnienie)
w	- woda
iz	- izolacja

Indeksy górne

0	- wartości początkowe
1	- wartości dolotowe

Liczby bezwymiarowe

Bi	-	liczba Biota
Nu	-	liczba Nusselta
Pr	-	liczba Prandtla
Re	-	liczba Reynoldsa
Sc	-	liczba Schmidta
Sh	-	liczba Sherwooda

Przemiany powietrza w złoźach zwirowych przedstawiono na wykresach i-x linią prostą.

1 Wprowadzenie

Podstawową intencją badań podjętych w rozprawie jest opracowanie i wdrożenie takich rozwiązań, które służą ochronie środowiska przed dalszą degradacją. Może to nastąpić w wyniku zastosowania nowych rozwiązań umożliwiających ograniczenie spalania surowców energetycznych niezbędnych dla sprawnego działania wentylacji i klimatyzacji i powodujących zawsze znaczne skażenie środowiska, zwłaszcza atmosfery. Niektórzy badacze skażenie atmosfery łączą z ociepleniem klimatu. W związku z powyższym pragnę na początku przybliżyć interesujące nas wszystkich zagadnienie: „Co naprawdę dzieje się z naszym klimatem – ochładza się czy ociepla?” [7].

Prognozowanie pogody nie jest łatwe. Każda z prognoz zależy od liczby przyjętych założeń. To powoduje, że przewidywanie pogody jest w znacznym stopniu subiektywne. Warto zwrócić uwagę, że prognozy krótkoterminowe oparte są na modelach, które mogą być „dostrajane” na podstawie obserwacji meteorologicznych. Niestety nie można zastosować tych modeli do przewidywania zmian klimatycznych w dalekiej przyszłości (za dziesiątki czy setki lat).

Na przełomie września i października 2003 roku odbyła się w Moskwie konferencja, w której udział wzięło około 2000 naukowców, przedstawiciele rządów oraz różnych organizacji z około 100 państw. Celem konferencji było omówienie licznych kontrowersji na temat przyczyn zmian klimatu. Dyskutowano o antropogenicznych i naturalnych czynnikach kształtujących klimat, o sposobach zmniejszania emisji gazów cieplarnianych (głównie CO₂), o skutkach zmian klimatu. Podjęto próbę osiągnięcia możliwie najlepszego porozumienia pomiędzy politykami, naukowcami, przemysłowcami i społeczeństwem [7].

Na konferencji postawiono zasadnicze pytanie: „Co naprawdę dzieje się z naszym klimatem – ochładza się czy ociepla?”. W ślad za nim nasuwa się kolejne: „Jeżeli nastąpi ocieplenie klimatu, to czy jest ono powodowane działalnością człowieka?”

Problemy te nurtują naukowców od lat. Nie udało się ich do tej pory jednoznacznie rozstrzygnąć. Panuje zgoda, że w ciągu minionych 400 tys. lat dochodziło na ziemi do wzrostu lub spadku temperatury, co nie było związane z działalnością człowieka. Dowodzą tego m. in. naukowcy z Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) oraz z Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Pod kierownictwem Geralda Hauga prowadzili badania dna Oceanu Spokojnego. Na ich podstawie stwierdzili, że przed 2,7 miliona lat wystąpiło ocieplenie klimatu – podobne do obecnie zauważalnego – które było

paradoksalnie początkiem zlodowacenia [18].

Naukowcy z Division of Paleontology, American Museum of Natural History w Nowym Jorku oraz z Canadian Museum of Nature (Paleobiology) w Ottawie również sądzą, że na ziemi dochodziło do wzrostu lub spadku temperatury. Na podstawie analiz roślin znalezionych w torfie doszli do wniosku, że temperatury 4 – 5 milionów lat temu były w ciągu lata o około 15°C a w ciągu zimy o 10°C wyższe niż notujemy dzisiaj [39].

Nie brak jest jednak głosów opowiadających się za hipotezą o globalnym ociepleniu spowodowanym przez człowieka.

„Klimat jest bardziej czuły na działalność ludzką niż myślimy” twierdzi Meinrat Andreae z Max Planck Institute of Chemistry in Mainz w Niemczech. Jeżeli model opracowany przez naukowców z instytutu, uwzględniający ocieplenie wywołane wzrostem stężenia CO₂ oraz ochłodzenie spowodowane przez aerozole okaże się poprawny, to w drugiej połowie dwudziestego pierwszego wieku mogą nastąpić zmiany klimatyczne bardziej dramatyczne niż myślimy [31].

Podobnego zdania jest Olivier Boucher z The Hadley Centre for Climate Prediction and Research in Exeter w Wielkiej Brytani. „Prognozy mogą być bardziej dramatyczne niż oczekujemy” – twierdzi.

Zwolennicy hipotezy globalnego ocieplenia wywołanego działalnością człowieka twierdzą, że „ludzkość musi zmniejszać emisję CO₂ bardziej agresywnie”.

Burzliwe debaty naukowców, jak dotąd, nie przynoszą jednoznacznej odpowiedzi na postawione wcześniej pytania. Co więcej, na konferencji w Moskwie nie osiągnięto porozumienia pomiędzy naukowcami, politykami, przemysłowcami i społeczeństwem. Nie poparto również jednogłośnie protokołu z Kyoto [29]. Nic nie wskazuje na to, aby w najbliższym czasie osiągnięto jakikolwiek kompromis.

Niezależnie od istniejących rozbieżności powinniśmy dążyć do ograniczenia emisji substancji szkodliwych dla środowiska. Głównym trucicielem środowiska jest przemysł, którego siłą napędową, podobnie jak i całej naszej cywilizacji, jest energetyka oparta na paliwach naturalnych: węgla, ropy i gazu. Produkty spalania tych paliw to głównie pyły, tlenki siarki, azotu i węgla. Zahamowanie degradacji środowiska może nastąpić m. in. poprzez:

— modernizację energetyki konwencjonalnej,

- zmniejszenie zużycia energii u odbiorcy końcowego,
- zwiększenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych.

Szczególne znaczenie ma oszczędność energii w budownictwie. Sektor mieszkaniowy i usługowy zużywa w krajach Unii Europejskiej ok. 40 % energii i zużycie to rośnie [16]. W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny wzrost liczby instalowanych systemów klimatyzacyjnych. Pojawiają się niedobory w czasie szczytowego obciążenia energetycznego. Powinno się dać priorytet strategiom poprawiającym charakterystyki energetyczne budynków, także w okresie letnim i powinien nastąpić dalszy rozwój niekonwencjonalnych metod chłodzenia [36].

W 2002 Parlament Europejski i Rada przyjęły Dyrektywę 2002/91/WE dotyczącą charakterystyki energetycznej budynków [16]. Celem jest poprawa charakterystyk energetycznych budynków we Wspólnocie pod kątem ograniczenia zużycia energii, z uwzględnieniem warunków klimatycznych zewnętrznych, wewnętrznych oraz opłacalności.

Do najważniejszych wymagań zawartych w dyrektywie należą:

- opracowanie ramowych wytycznych dla metodologii obliczeń zintegrowanych wskaźników charakterystyki energetycznej budynków,
- określenie minimalnych wymagań dotyczących charakterystyki energetycznej budynków: istniejących, poddawanych gruntownej modernizacji i nowych,
- wprowadzenie certyfikacji energetycznej budynków,
- wprowadzenie regularnej kontroli kotłów, instalacji klimatyzacyjnych i grzewczych w budynkach.

Zagadnieniami energooszczędnego kształtowania zdrowego i komfortowego mikroklimatu wewnętrznego zajmuje się obecnie wiele ośrodków naukowo – badawczych na świecie. Przodują kraje gospodarczo najbardziej rozwinięte, ale obserwuje się wzrost zainteresowania tymi zagadnieniami w krajach rozwijających się.

W naszym kraju potrzebny jest przełom w zakresie wdrażania nowoczesnych technologii w inżynierii środowiska, z uwagi na znaczące opóźnienie w porównaniu do rozwiniętych krajów Unii Europejskiej. Dotyczy to efektywnych energetycznie technik, jak i uregulowań prawnych [36]. Zaleca się stosowanie w szerszym zakresie: energii słonecznej, wiatrowej, geotermalnej oraz energii pozyskiwanej z biomasy. Umiejętne

korzystanie z energii poprzez magazynowanie w okresach jej nadmiaru, odzysk i wyższą efektywność stosowanych procesów, spowoduje zmniejszenie jej zużycia i przyczyni się do ograniczenia dalszego skażenia środowiska naturalnego.

1.1 Pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych

W krajach Unii Europejskiej do roku 2010 przewidywany jest wzrost udziału energii odnawialnej w ogólnym zapotrzebowaniu na energię do 12% [17]. Przyjęta w dniu 9 września 2000 r. przez Radę Ministrów, a następnie 23 sierpnia 2001 r. przez Sejm Rzeczypospolitej Polskiej „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej” zmieniła podejście Rządu do możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Przyjęcie założonych w „Strategii...” celów miało znaczenie nie tylko dla rozwoju energetyki odnawialnej, ale także dla całej polityki energetycznej kraju [42]. „Strategia ...” wyznacza cele jakie muszą być osiągnięte w określonym czasie. Według wariantu optymistycznego do 2010 roku udział energii odnawialnej w zużyciu energii pierwotnej wyniesie 5,5 %. Jest to zadanie nad wyraz ambitne. W stosunku do około 2,6 % udziału tego rodzaju energii w 2001 r., oznacza to dwukrotny wzrost wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w obecnym dziesięcioleciu. Założenia wydają się być realne. Potwierdzają to np. przeprowadzone analizy symulacyjne [23].

W tabeli 1 przedstawiono podział oraz charakterystykę odnawialnych źródeł energii. [30].

Tabela 1. Podział odnawialnych źródeł energii [30]

Pierwotne źródła energii		Naturalne procesy przemiany energii	Techniczne procesy przemiany energii	Forma uzyskanej energii
Słońce	Woda	Parowanie, topnienie lodu i śniegu, opady	Elektrownie wodne	Energia elektryczna
	Wiatr	Ruch atmosfery	Elektrownie wiatrowe	Energia cieplna i elektryczna
		Energia fal	Elektrownie falowe	
	Promieniowanie słoneczne	Prądy oceaniczne	Elektrownie wykorzystujące prądy oceaniczne	Energia elektryczna
		Nagrzewanie powierzchni Ziemi i atmosfery	Elektrownie wykorzystujące ciepło oceanów	Energia elektryczna
			Pompy ciepła	Energia cieplna
		Promieniowanie słoneczne	Kolektory i ciepłne elektrownie słoneczne	Energia cieplna
			Fotoogniwa i elektrownie słoneczne	Energia elektryczna
	Biomasa	Produkcja biomasy	Fotoliza	Paliwa
			Ogrzewanie i elektrownie ciepłne	Energia cieplna i elektryczna
Urządzenia przetwarzające			Paliwa	
Ziemia	Rozpad izotopów	Źródła geotermalne	Ogrzewanie i elektrownie geotermalne	Energia cieplna i elektryczna
Księżyc	Grawitacja	Pływy wód	Elektrownie pływowe	Energia elektryczna

1.1.1 Pozyskiwanie energii gruntu

W jądrze Ziemi temperaturę szacuje się na 3000 – 6200 °C . Temperatura maleje zbliżając się do powierzchni Ziemi zależnie od rodzaju skał i warunków geologicznych, średnio od 15 do 80 K na jeden kilometr [30]. Różnica temperatur pomiędzy gorącym wnętrzem i chłodną powierzchnią Ziemi wywołuje przepływ strumienia ciepła geotermicznego o średniej gęstości około 63 kW/km² [33]. Docierająca do powierzchni Ziemi energia zostaje wypromieniowana w przestrzeń kosmiczną w formie promieniowania długofalowego. Przyjmuje się, że średnia temperatura powierzchni Ziemi wynosi 15 °C. Rzeczywiste wartości zmieniają się w zależności od szerokości geograficznej, pory roku oraz dnia, i zależą od trzech najważniejszych strumieni ciepła:

- doprowadzonego przez promieniowanie ze Słońca,
- doprowadzonego przez przewodzenie lub konwekcję z jądra Ziemi,

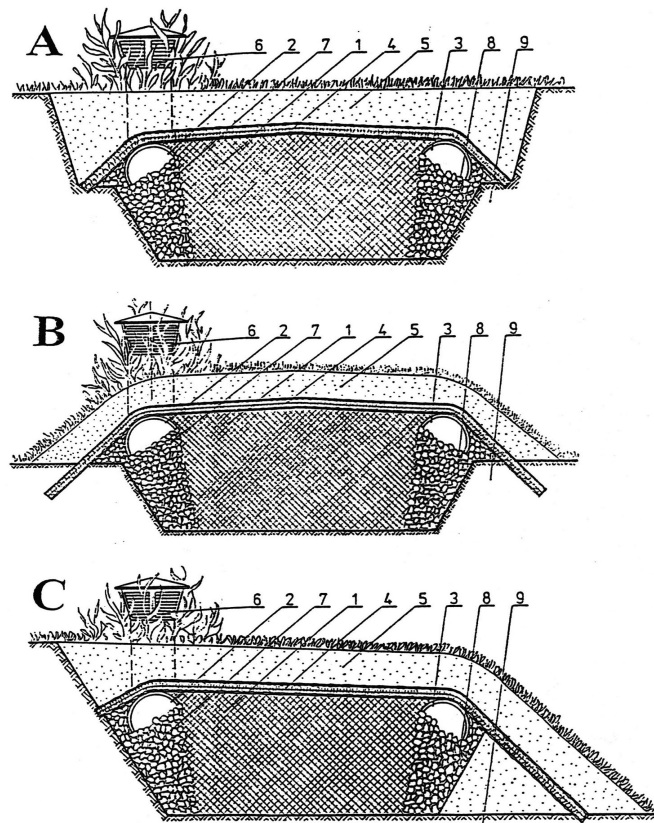
— wypromieniowanego do przestrzeni kosmicznej.

Energię zmagazynowaną w skorupie ziemskiej nazywamy energią geotermalną. Całkowite zasoby energii geotermalnej w Polsce są ogromne, jednak tylko niewielka jej część może być wykorzystana praktycznie, co wynika między innymi z aktualnych możliwości technicznych i opłacalności ekonomicznej pozyskania energii z głębi Ziemi [40]. Dotyczy to w szczególności energii pozyskiwanej ze znacznych głębokości.

Energię gruntu można pozyskiwać również z nieznaczej głębokości. Temperatura gruntu na głębokości 4 – 5 m jest prawie stała przez cały rok i zbliżona do średniej temperatury powietrza zewnętrznego. W naszym środkowoeuropejskim klimacie wynosi ok. $+10 (\pm 1,5)$ °C. Zjawisko to wykorzystywane jest m. in. w wymiennikach gruntowych: przeponowym i bezprzeponowym. Rolą takich wymienników jest wstępna obróbka powietrza, polegająca na podgrzaniu powietrza wentylacyjnego zimą i ochładzaniu latem.

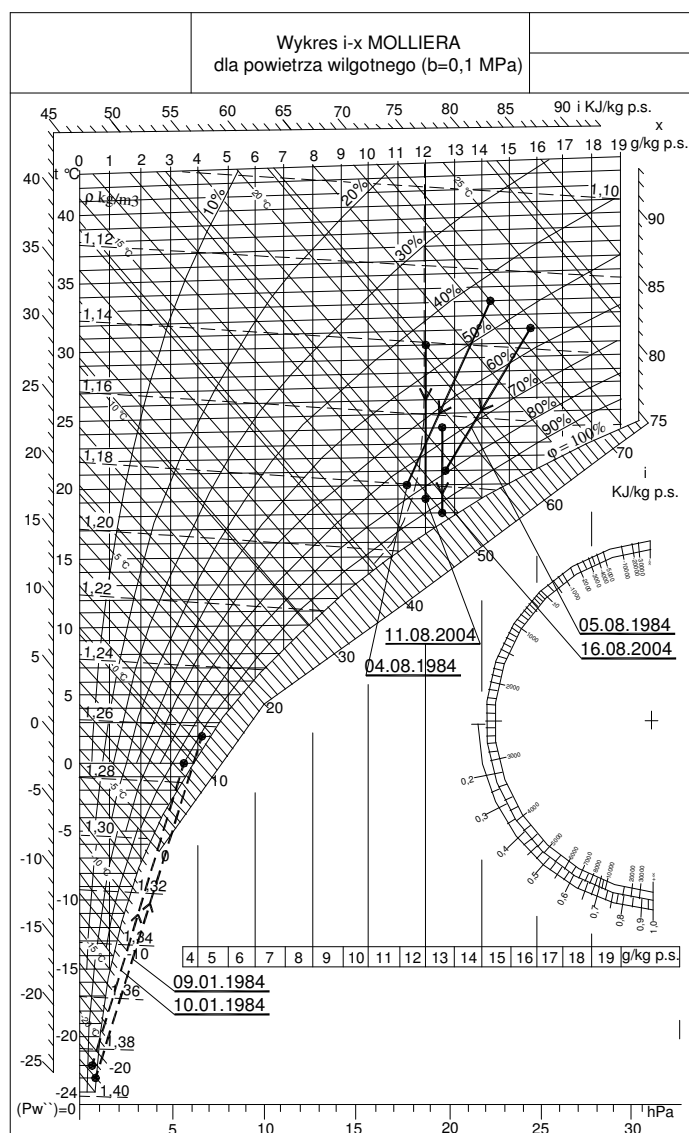
Pierwsze bezprzeponowe gruntowe wymienniki ciepła i masy nazywano gruntowymi ujęciami powietrza. Powietrze dla celów wentylacji i klimatyzacji pobierane było poprzez grunt. Ujęcie wykonywane było np. w postaci ażurowej rury lub komory umieszczonej na głębokości 3 – 4 m. Głównym celem takich ujęć była filtracja powietrza. Pomiarzy wykazały jednak, że w zimie powietrze podgrzewa się, natomiast latem – chłodzi [34, 41, 43, 45]. W roku 1941 L. Motzko przedstawił projekt dotyczący wykorzystania chłodu i ciepła z ziemi i powietrza [32]. Podstawową wadą tych rozwiązań były stosunkowo duże opory przepływu powietrza przekraczające 1500 Pa.

W instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej od ponad 27 lat prowadzone są badania nad pozyskiwaniem naturalnej energii z nieznaczej głębokości gruntu dla celów wentylacji lub klimatyzacji w bezprzeponowym gruntowym wymienniku ciepła i masy (BGWCiM) [1, 2, 3, 8, 9, 10]. W wymienniku takim powietrze zewnętrzne jest prowadzone poziomo przez złożo akumulacyjne o długości 3-5 m, np. zagłębione w gruncie (rysunek 1) [10]. Szczegółowy opis rozwiązania oraz wyniki badań zamieszczono w pracach [4, 5, 6, 8, 10].



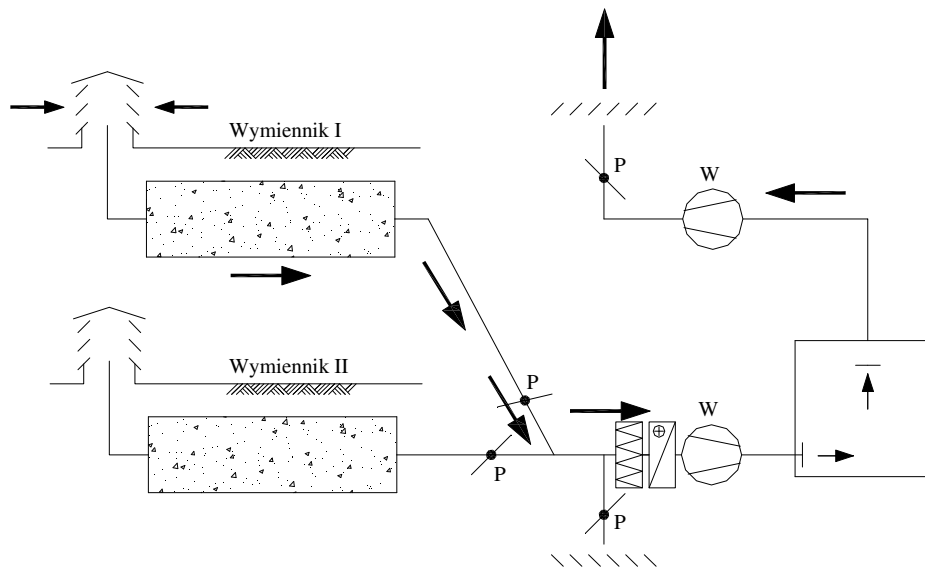
Rysunek 1. Różne propozycje wykonania wymiennika: A- zagłębiony, B- zagłębiony częściowo, C- wyniesiony ponad poziom istniejącego terenu i usytuowany przy skarpie. 1-złoże akumulacyjne, 2-kanal rozprowadzający, 3-kanal zbierający, 4-izolacja ciepłno-wilgotnościowa, 5-przykrycie wymiennika, 6-czerpnia powietrza, 7-złoże rozprowadzające, 8-złoże zbierające, 9-grunt rodzimy [4,5,6, 8, 10]

W wyniku kontaktu przepływającego powietrza pomiędzy wypełnieniem złoża następuje zbliżenie jego temperatury do temperatury wypełnienia. Na podstawie danych doświadczalnych można stwierdzić, iż w okresach szczytowych możliwe jest podgrzanie powietrza zewnętrznego zimą od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i w lecie ochłodzenie go od $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 5, 6, 8, 10]. Możliwe jest zatem pozyskiwanie dla układu klimatyzacyjnego czasem nawet całkowitego zapotrzebowania chłodu latem i zazwyczaj do 50 % tzw. ciepła wentylacyjnego w okresach szczytów zimowych. W związku z tym, że wymiennik jest bezprzeponowy, następuje również korzystne nawilżanie powietrza zimą oraz często pożądane osuszanie latem. Na rysunku 2 przedstawiono na wykresie i-x przykładowe charakterystyczne przemiany powietrza przepływającego przez bezprzeponowy gruntowy wymiennik ciepła i masy [8, 9, 10].



Rysunek 2. Wykres i-x: przykładowe charakterystyczne przemiany powietrza przepływającego przez wymiennik gruntowy [5, 6, 7]

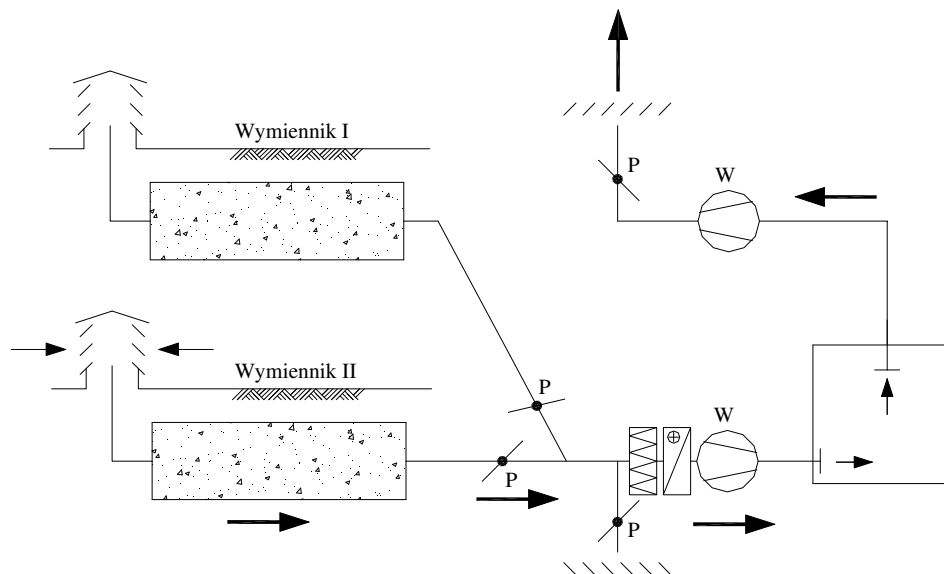
Besler M. [10] dla pracy ciągłej zaleca stosowanie dwóch naprzemiennie pracujących wymienników [10] (rysunek 3, 4). Przełączanie układu następuje co np. 12 godzin. W czasie pracy wymiennika nr I wymiennik nr II ulega regeneracji (następuje wymiana ciepła i masy z otaczającym gruntem (rysunek 3)). Po 12 godzinach wymiennik nr I ulega regeneracji, natomiast powietrze przepływa przez wymiennik nr II (rysunek 4).



Rysunek 3. Schemat układu uzdatniania powietrza z dwoma naprzemiennie pracującymi wymiennikami.

Praca wymiennika nr I.

Oznaczenia: W – wentylator; P – przepustnica; F – filtr; N – nagrzewnica



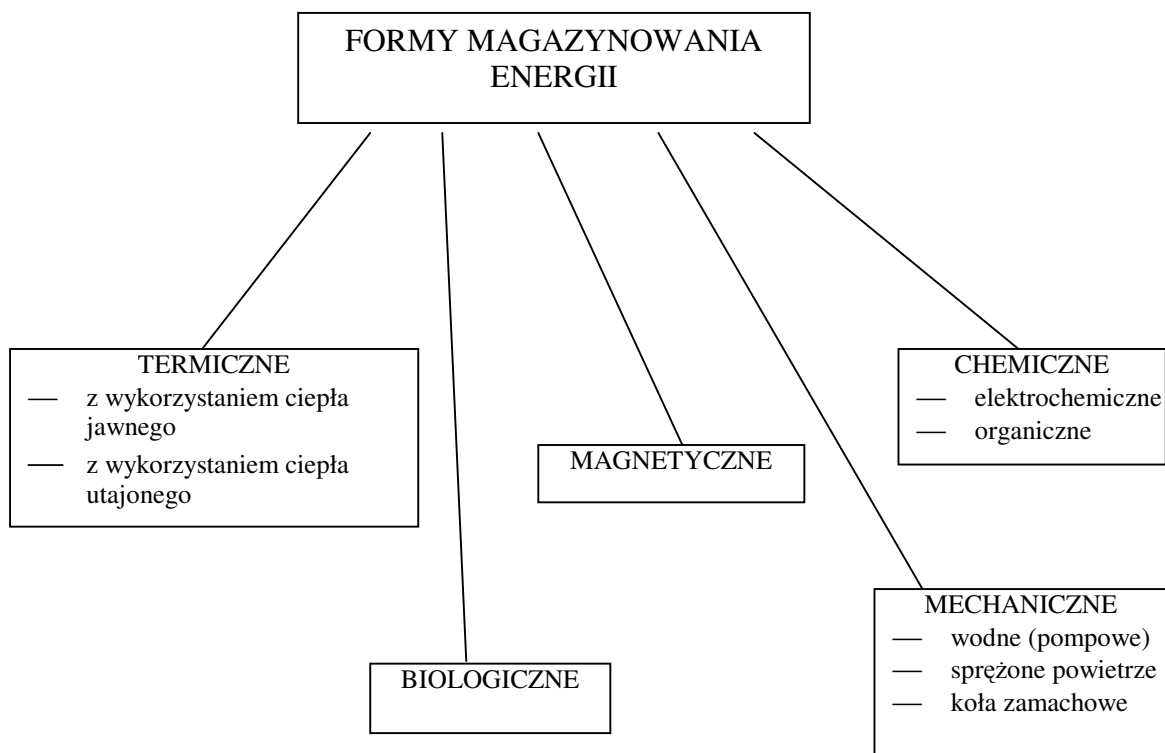
Rysunek 4. Schemat układu uzdatniania powietrza z dwoma naprzemiennie pracującymi wymiennikami.

Praca wymiennika nr II.

Oznaczenia: W – wentylator; P – przepustnica; F – filtr; N – nagrzewnica

1.2 Magazynowanie energii

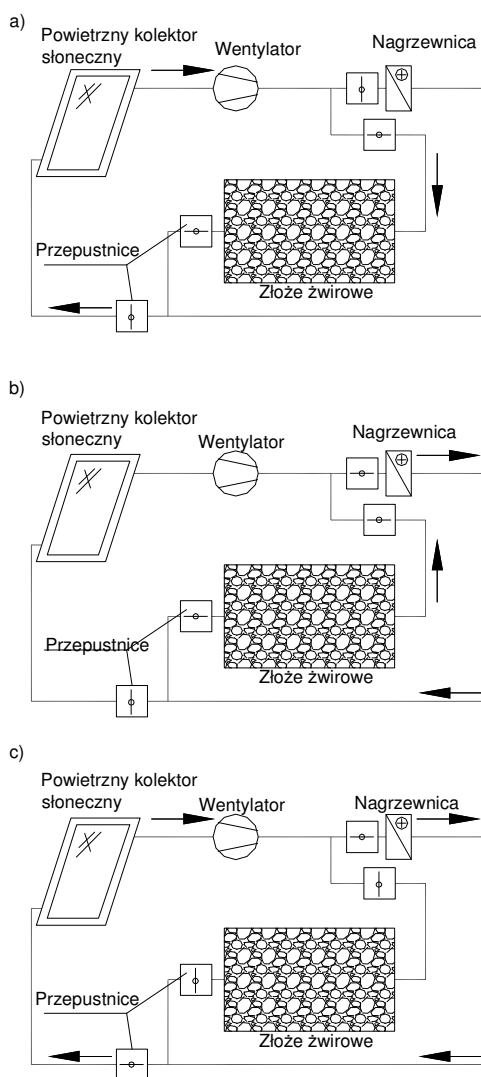
Magazynowanie energii jest niezwykle ważne w wielu zastosowaniach inżynierskich. Np. przy pozyskiwaniu energii słonecznej istnieje potrzeba wykorzystania nadmiaru zgromadzonej energii. Magazynowanie tej energii i wykorzystanie jej w godzinach późniejszych przy braku lub ograniczonym promieniowaniu słonecznym, pozwala zwiększyć efektywność systemu. Podobny problem dotyczy ciepła odpadowego, kiedy jego dostępność oraz zapotrzebowanie są przesunięte w czasie.



Rysunek 5. Formy magazynowania energii [14]

Podziału technik magazynowania energii można dokonać np. zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5 [14].

Jednym ze sposobów magazynowania energii cieplnej pozyskiwanej w powietrznych kolektorach słonecznych jest zastosowanie źródeł zwirowych [11, 14, 15]. Jeżeli strumień ciepła pozyskany z kolektorów słonecznych jest porównywalny lub mniejszy od zapotrzebowania, wówczas podgrzane powietrze kierowane jest bezpośrednio do pomieszczenia (w razie potrzeby dogrzewane jest jeszcze w nagrzewnicy) rysunek 6a. W okresie nadmiaru pozyskanej energii cieplnej, nadwyżki magazynowane mogą być w złożu zwirowym (rysunek 6b). Przy braku promieniowania słonecznego układ wentylacyjny wykorzystuje energię zmagazynowaną w akumulatorze (rysunek 6c).



Rysunek 6. Magazynowanie energii słonecznej w złożu zwirowym [11, 14, 15]

Złoża żwirowe mogą służyć również do magazynowania chłodu w okresie letnim. W pracy [22] zaprezentowano układ wentylacji szklarni z izolowanym złożem żwirowym. W nocy wentylator przetłacza powietrze przez wypełnienie złoża. W ciągu dnia zmagazynowany chłód wykorzystywany jest do chłodzenia szklarni.

2 Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie rozwiązań zwiększających efektywność pozyskiwania energii cieplnej (także chłodu) dla wentylacji i klimatyzacji, z zastosowaniem źródeł żwirowych.

W oparciu o powyższe stawia się tezę:

Istnieją możliwości znacznego ograniczenia zużycia energii pierwotnej w układach wentylacji i klimatyzacji, w wyniku zwiększenia efektywności odzysku oraz poprzez wdrożenie dotychczas niestosowanych, nowych rozwiązań.

W pracy przedstawiono dwa nowe rozwiązania pozwalające zwiększyć efektywność pozyskiwania lub magazynowania energii z wykorzystaniem źródeł żwirowych.

Rozwiązanie 1

Układ wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymienników gruntowych. Układ ten jest modyfikacją instalacji wentylacyjnej z rozdziału 1.1.1 (Rysunki 3 i 4). Przedstawione zostaną wyniki badań regeneracji wymiennika gruntowego. Na podstawie symulacji komputerowych przeprowadzona zostanie również analiza energetyczna i finansowa układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymienników gruntowych. Analiza sporządzona zostanie na podstawie danych klimatycznych roku reprezentatywnego czterech miast Polski: Poznania, Kołobrzegu, Warszawy i Krakowa.

Rozwiązanie 2

Przedstawiona zostanie propozycja zastosowania izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu pozyskanego z powietrza zewnętrznego w godzinach nocnych. Opracowany i zweryfikowany zostanie model matematyczny wymiany ciepła w izolowanym złożu żwirowym. Na podstawie symulacji komputerowej przeprowadzona zostanie analiza energetyczna i finansowa układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego. Analiza sporządzona zostanie dla roku reprezentatywnego czterech miast Polski: Poznania, Kołobrzegu, Warszawy i Krakowa.

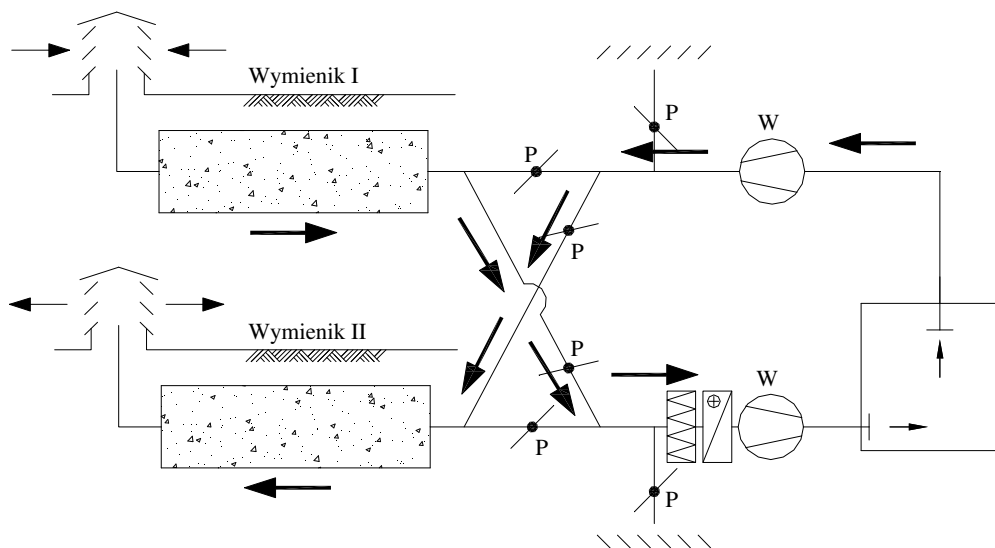
3 Opis przeprowadzonych badań

3.1 Badanie regeneracji wymiennika gruntowego powietrzem usuwanym z pomieszczenia

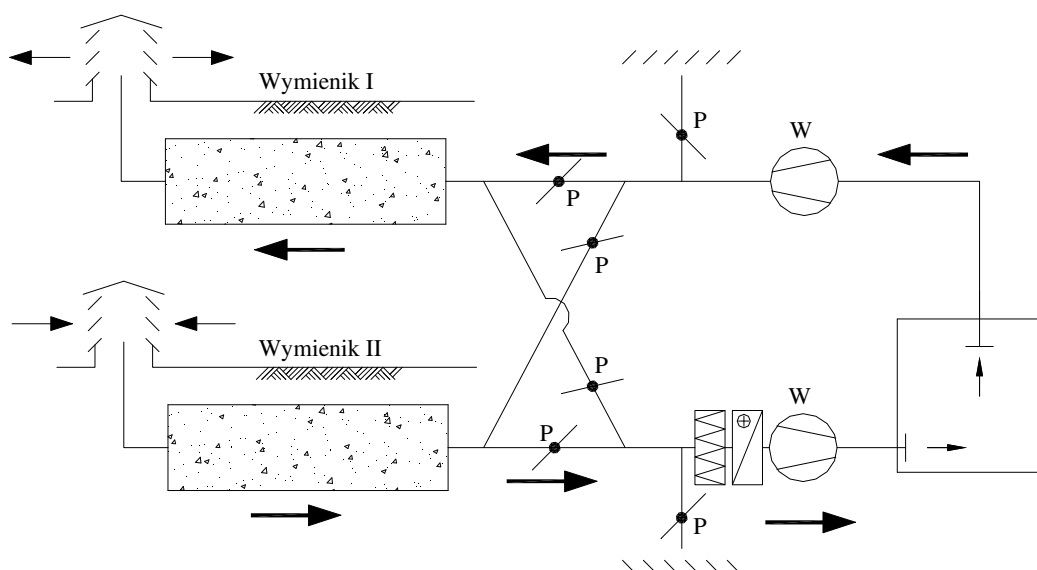
Idea rozwiązania polega na zastosowaniu dwóch naprzemiennie pracujących wymienników gruntowych. Dzięki temu możliwe staje się wykorzystanie powietrza usuwanego z pomieszczeń do regeneracji złoża żwirowego wymiennika gruntowego. Wymienniki pracują w cyklach 12-godzinnych. Poniżej przedstawiono przykład pracy instalacji uzdatniania powietrza z zastosowaniem dwóch wymienników gruntowych.

Czas pracy wymiennika w jednym cyklu wybrano tak, aby przełączanie układu następowało o jednakowej porze doby. Możliwe staje się wówczas dopasowanie momentu przełączania do dobowego przebiegu temperatury zewnętrznej i zapotrzebowania ciepła.

Powietrze usuwane z pomieszczenia ogrzewa wypełnienie wymiennika nr II. Powietrze zewnętrzne przepływa przez wymiennik nr I (rysunek 7). Po 12 godzinach następuje przełączenie instalacji. Powietrze zewnętrzne ogrzewa się w wymienniku nr II, natomiast powietrze z pomieszczenia przepływa przez wymiennik I. (rysunek 8)



Rysunek 7. Schemat układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem dwóch wymienników gruntowych. Cykl I - ładowanie wymiennika nr II. Oznaczenia: W - wentylatory; P - przepustnice; N - nagrzewnica



Rysunek 8. Schemat układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem dwóch wymienników gruntowych. Cykl II - ładowanie wymiennika nr I. Oznaczenia: W - wentylatory; P - przepustnice; N - nagrzewnica

Warunkiem niezbędnym pozwalającym na zastosowanie takiej regeneracji złożeń, jest brak lotnych substancji toksycznych w powietrzu usuwanym z pomieszczenia (regenerującym złoża żwirowe).

3.1.1 Opis stanowiska badawczego

W skład stanowiska wchodzi (dokładny rysunek oraz charakterystykę stanowiska badawczego zamieszczono w załączniku nr 1):

- wymiennik gruntowy o wymiarach 0,7 x 0,7 x 5m, charakterystyczne parametry złoża zamieszczono w tabeli 2,
- wentylator, (W),
- nagrzewnica elektryczna, (N),
- kryza pomiarowa, (K),
- przepustnice regulacyjne z siłownikami, (P),
- przełącznik czasowy sterujący pracą przepustnic,
- rejestrator temperatury z czujnikami temperatury.

Tabela 2. Charakterystyka wymiennika gruntowego

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry wymiennika gruntowego	Wysokość złoża,	A	0,7	m
	Szerokość złoża,	B	0,7	m
	Długość złoża	L	5,0	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,14* 0,12**	m/s
	Strumień powietrza	V	247* 212**	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża (grys granitowy 10/20 mm)	Średnica zastępcza	d_z	13,4	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,42	-
	Gęstość	ρ_s	2680	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	815	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,243	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

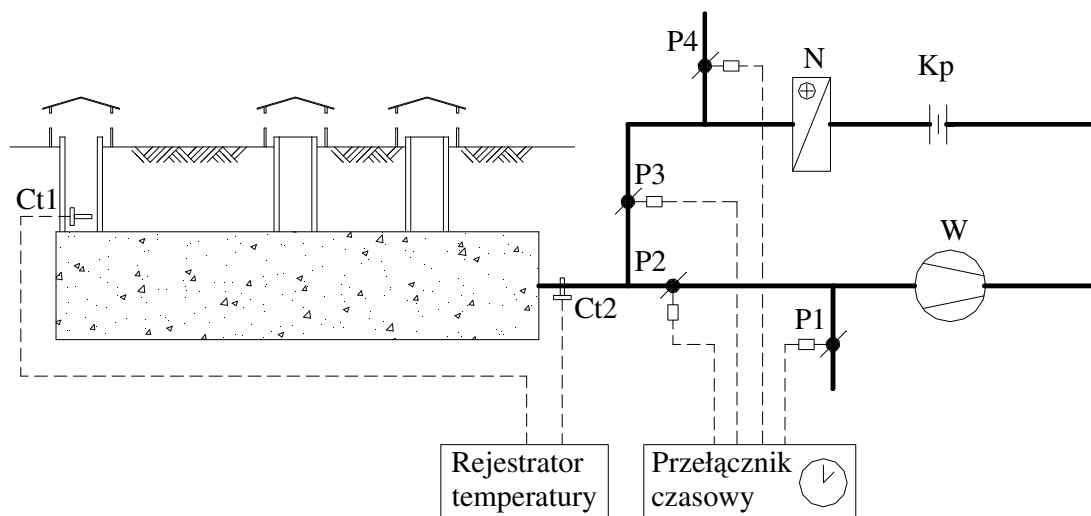
Do pomiaru temperatury użyto czujników oporowych podłączonych do rejestratora. Strumień przepływającego powietrza mierzony był za pomocą kryzy pomiarowej podłączonej do u-rurki wypełnionej alkoholem etylowym o gęstości 789 kg/m³ (20°C). Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 9.

Badania przeprowadzone zostały dla następujących warunków:

- strumień powietrza $V=247 \text{ m}^3/\text{h}^*/ V=212 \text{ m}^3/\text{h}^{**}$,
- opory przepływu powietrza przez wymiennik gruntowy $\Delta p=148^*/110^{**} \text{ Pa}$,
- średnica zastępcza ziaren złoża (grys granitowy) $d_z=13,4 \text{ mm}$,
- prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża $w_0=0,14^*/0,12^{**} \text{ m/s}$,
- wartości temperatury rejestrowane były co 15 min.

* Dane z okresu listopad 2003 – marzec 2004

** Dane z okresu październik 2004 – marzec 2005



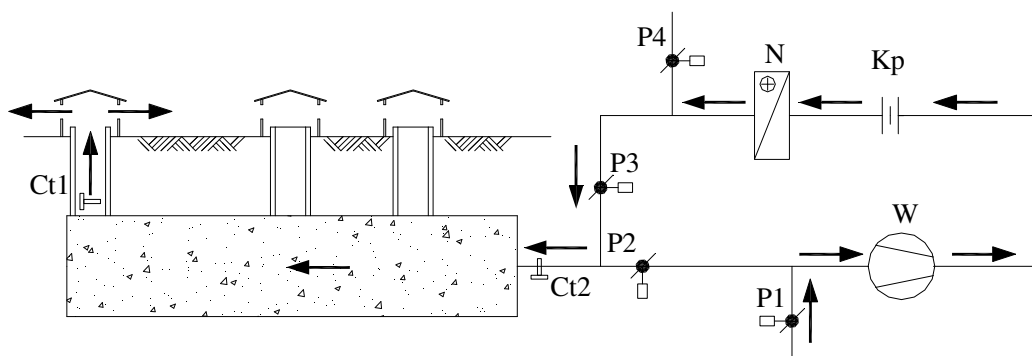
Rysunek 9. Schemat stanowiska badawczego wymiennika gruntowego. Oznaczenia: Ct1, Ct2 – czujniki temperatury; N – nagrzewnica elektryczna; W – wentylator; Kp – kryza pomiarowa; P1, P2, P3, P4 – przepustnice regulacyjne z siłownikami

3.1.2 Opis badań

Badania przeprowadzono w okresie listopad 2003 ÷ marzec 2004 oraz październik 2004 ÷ marzec 2005 na stanowisku badawczym znajdującym się przy budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

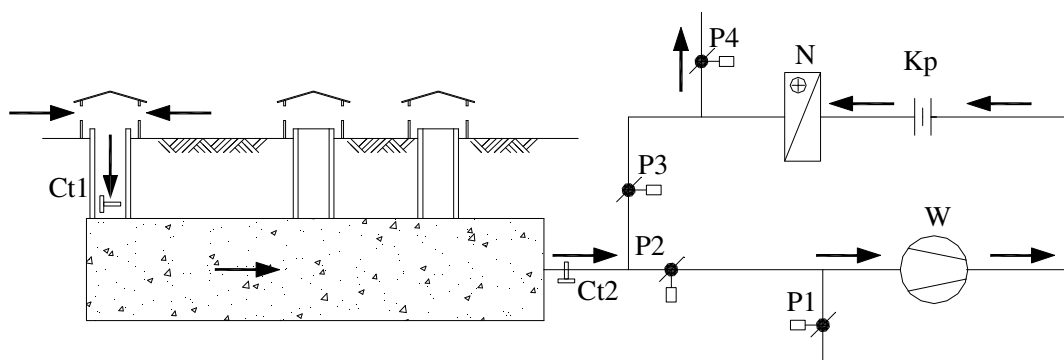
Ze względu na brak dwóch bliźniaczych wymienników badania przeprowadzono na jednym wymienniku pracującym w cyklach 12-godzinnych „ładowanie – rozładowanie”.

Przełączanie układu następowało co 12 godzin. W dzień powietrze z pomieszczenia nagrzewane było w nagrzewnicy elektrycznej do temperatury około 20°C, następnie przepływało przez złożo wymiennika gruntowego i ogrzewało wypełnienie (rysunek 10). Przepustnice P2 i P4 były zamknięte, P1 i P3 otwarte.



Rysunek 10. Schemat pracy badanego układu. Cykl I – ładowanie wymiennika. Oznaczenia: P1, P2, P3, P4 – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct1 i Ct2 – czujniki temperatury

Po przełączeniu układu powietrze zewnętrzne przepływa przez wypełnienie złoża i ogrzewa się. Przepustnice P1 i P3 są zamknięte, P2 i P4 są otwarte (rysunek 11).



Rysunek 11. Schemat pracy badanego układu. Cykl II – odzysk zmagazynowanego ciepła. Oznaczenia: P1, P2, P3, P4 – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct1 i Ct2 – czujniki temperatury

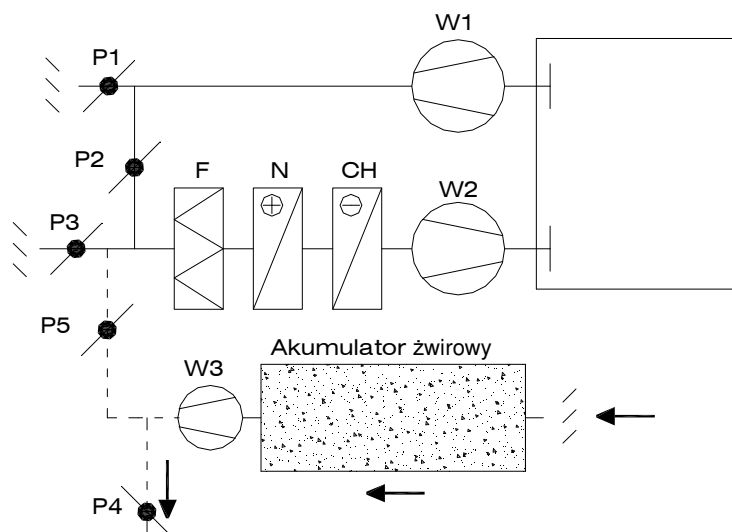
3.2 Badania magazynowania chłodu w zasobnikach żwirowych

W ramach prac Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa mających na celu opracowywanie nowych rozwiązań pozyskiwania energii naturalnej prowadzone były badania dotyczące m. in. pozyskiwania ciepła w okresie zimowym i przejściowym w powietrznych kolektorach słonecznych i magazynowania ciepła w izolowanych złożach żwirowych [19, 28].

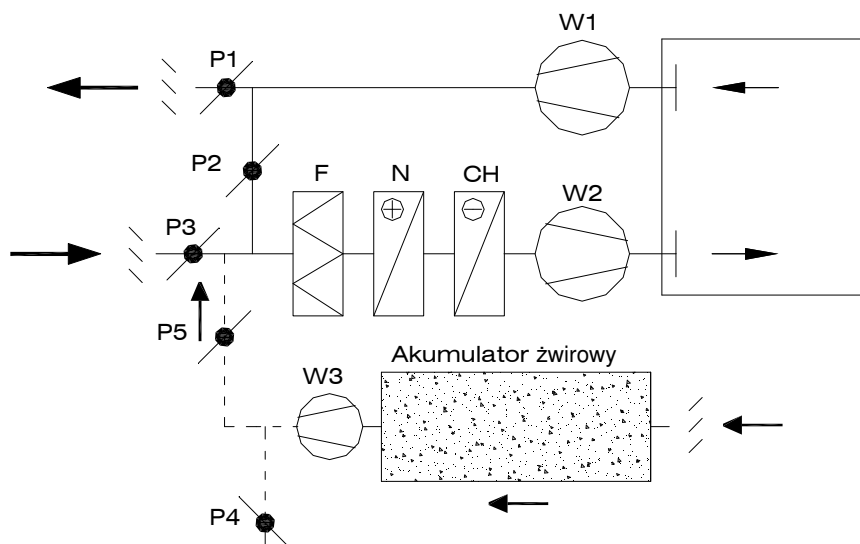
Stwierdzono realną możliwość zastosowania akumulatorów żwirowych do magazynowania chłodu uzyskiwanego w okresie letnim z powietrza zewnętrznego w

godzinach nocnych.

Idea rozwiązania polega na chłodzeniu wypełnienia izolowanego złoża żwirowego powietrzem zewnętrznym w godzinach nocnych. W ciągu dnia powietrze zewnętrzne przepływa przez wypełnienie i ulega schłodzeniu. Przykład instalacji wentylacyjnej z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Układ automatycznej regulacji w zależności od wymaganej temperatury nawiewu steruje przepustnicami P1, P2, P3 oraz P4 i P5.



Rysunek 12. Schemat układu uzdatniania powietrza z izolowanym złożem żwirowym do magazynowania chłodu. Praca w nocy. Oznacznia: W – wentylator; F – filtr; N – nagrzewnica; CH – chłodnica; P – przepustnica



Rysunek 13. Schemat układu uzdatniania powietrza z izolowanym złożem żwirowym do magazynowania chłodu. Praca w dzień. Oznacznia: W – wentylator; F – filtr; N – nagrzewnica; CH – chłodnica; P – przepustnica

3.2.1 Opis stanowisk badawczych oraz przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono na zasobnikach żwirowych znajdujących się w laboratorium badawczym w budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej:

Złoże żwirowe nr I (wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych przez dr inż. Magdalenę Budzisz w ramach pracy doktorskiej pt „Magazynowanie energii naturalnej dla celów kształtowania mikroklimatu wewnątrz”. [11])

W skład stanowiska wchodzi (dokładny rysunek oraz charakterystykę stanowiska badawczego zamieszczono w załączniku nr 1):

- akumulator żwirowy o wymiarach 1,0 x 1,0 x 4m, charakterystyczne parametry złoża zamieszczono w tabeli 3,
- wentylator (W),
- kryza pomiarowa (Kp),
- przepustnice regulacyjne z siłownikami (P),
- czujniki temperatury i wilgotności podłączone do systemu archiwizacji danych BMS.

Tabela 3. Charakterystyka złoża żwirowego nr I

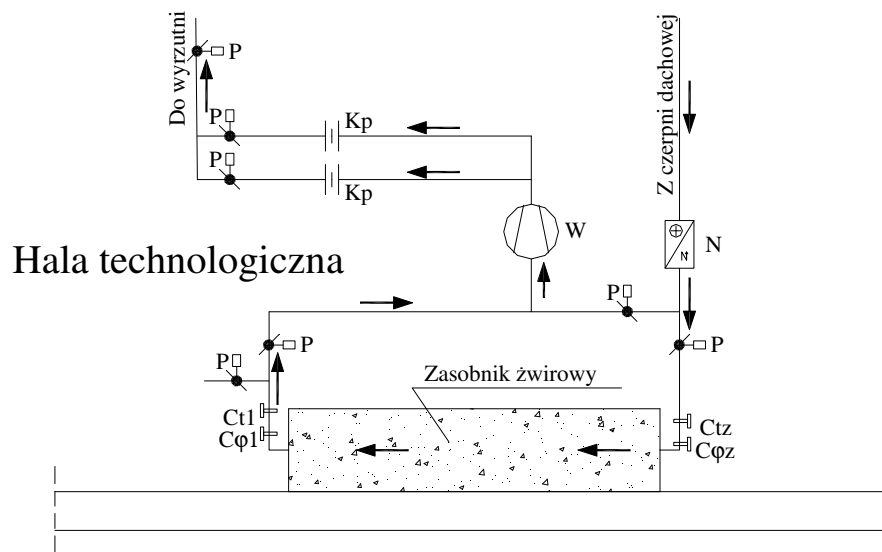
	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry złoża żwirowego nr I	Wysokość złoża,	A	1,0	m
	Szerokość złoża,	B	1,0	m
	Długość złoża	L	4,0	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,07	m/s
	Strumień powietrza	V	252	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

Strumień przepływającego powietrza mierzony był za pomocą kryzy pomiarowej podłączonej do u-rurki wypełnionej alkoholem etylowym o gęstości 789 kg/m³ (20°C).

Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 14.

Badania przeprowadzone zostały dla następujących warunków:

- strumień powietrza $V=252 \text{ m}^3/\text{h}$,
- opory przepływu powietrza przez zasobnik żwirowy $\Delta p=48 \text{ Pa}$,
- prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża $w_0=0,07 \text{ m/s}$,



Rysunek 14. Schemat stanowiska badawczego zasobnika nr 1. Oznaczenia: P – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct2 i Ct1 – czujniki temperatury; Cφ2, Cφ1 – czujniki wilgotności względnej

Instalacja pracowała 24 godziny na dobę. Powietrze zewnętrzne przepływało przez złożo w jednym kierunku. Pomiar temperatury oraz wilgotności dokonywany był przez system BMS w sposób ciągły.

Złoże żwirowe nr II.

W skład stanowiska wchodzi (dokładny rysunek oraz charakterystykę stanowiska badawczego zamieszczono w załączniku nr 1):

- akumulator żwirowy o wymiarach 0,36 x 0,6 x 1,92m, charakterystyczne parametry złoża zamieszczono w tabeli 4,
- wentylator (W),
- kryza pomiarowa (Kp),
- przepustnice regulacyjne (P),
- czujniki temperatury i wilgotności podłączone do systemu archiwizacji danych BMS.

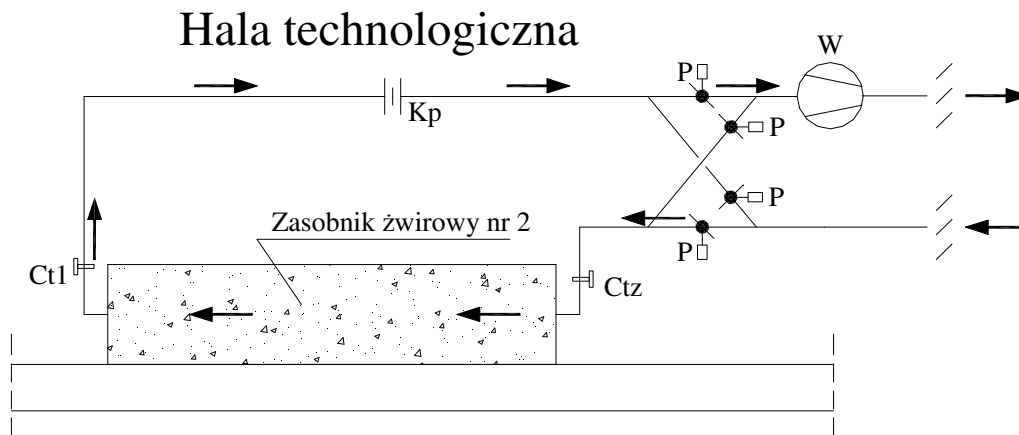
Tabela 4. Charakterystyka złoża żwirowego nr II

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry złoża żwirowego nr 2	Wysokość złoża,	A	0,36	m
	Szerokość złoża,	B	0,6	m
	Długość złoża	L	1,92	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,10	m/s
	Strumień powietrza	V	78	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^c	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

Strumień przepływającego powietrza mierzony był za pomocą kryzy pomiarowej podłączonej do u-rurki wypełnionej alkoholem etylowym o gęstości 789 kg/m³ (20°C). Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 15.

Badania przeprowadzone zostały dla następujących warunków:

- strumień powietrza $V=78$ m³/h,
- opory przepływu powietrza przez zasobnik żwirowy $\Delta p=52$ Pa,
- prędkość napływu powietrza $w_0=0,10$ m/s,



Rysunek 15. Schemat stanowiska badawczego zasobnika nr 2. Oznaczenia: P – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct1 i Ct2 – czujniki temperatury; C ϕ 1, C ϕ 2 – czujniki wilgotności względnej

Instalacja pracowała 24 godziny na dobę. Powietrze zewnętrzne przepływało przez izolowane złożę w jednym kierunku. Pomiar temperatury oraz wilgotności dokonywany był przez system BMS w sposób ciągły.

Pomiary wykonywano w okresie sierpień – listopad 2005 r.

4 Modele matematyczne wymiany ciepła i masy w złoźach zwirowych

Dla zrealizowania celów sformułowanych w rozdziale 2 niezbędne są modele matematyczne wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku ciepła i masy oraz w złoźu zwirowym. Posłużą one do opracowania programów komputerowych umożliwiających symulowanie pracy wymienników w różnych układach wentylacyjnych czy klimatyzacyjnych. Umożliwią również przeprowadzenie analizy energetycznej.

Zgodnie z pracami [13, 26] terminem „złoźe” określa się układ wielofazowy złożony z fazy stałej (wypełnienia ziarnistego) oraz fazy płynnej (w przestrzeni międzyziarnowej).

Dokładny opis zjawisk termodynamicznych zachodzących w złoźach jest niezwykle trudny. Ma to związek z heterogenicznością, nieciągłością fazy stałej oraz z losowym rozmieszczeniem przestrzeni międzyfazowej. Dodatkowo nie można zastosować opisów teoretycznych procesów termodynamicznych zachodzących w ośrodkach ciągłych i jednorodnych [12, 19].

Próbie opisu teoretycznego podjął się Gunn w pracy [20]. Jednak, jak stwierdza Kowalczyk [26], praca ta służy raczej wyjaśnieniu zjawisk dyspersji. Do praktycznego zastosowania wykorzystać można różniczkowe równania bilansu energii omówione przez Wakao i Kaguei [46].

Dokładnego przeglądu teorii modelowania matematycznego procesu wymiany ciepła i masy w złoźach ziarnistych dokonali Kowalczyk i Gryglewicz w pracach [19, 26]. Przedstawili trzy modele:

— Model Schumanna

Założono tu tłokowy przepływ płynu, pominięto przewodzenie ciepła w obu fazach złoźa oraz przyjęto wyrównaną temperaturę ziarna.

Równanie bilansu energii w fazie płynnej

$$\rho_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\rho_f \cdot w \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \alpha \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot (T_s - T_f) \quad (4.1)$$

Równanie bilansu energii w fazie stałej

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_s - T_f) \quad (4.2)$$

— **Model C-S (Continuous – Solid Phase model)**

Założono tu, że faza stała jest ciągła i uwzględniono procesy dyfuzyjne w obu fazach.

Równanie bilansu energii w fazie płynnej

$$\rho_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_a \cdot \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - \rho_f \cdot w \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \alpha \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot (T_s - T_f) \quad (4.3)$$

Równanie bilansu energii w fazie stałej

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_a \cdot \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \alpha \cdot \sigma \cdot (T_s - T_f) \quad (4.4)$$

— **Model D – C (Dispersion – Concentric model)**

Uwzględniono promieniową symetrię temperatury w ziarnie oraz dyspersję w fazie płynnej.

Równanie bilansu energii w fazie płynnej

$$\rho_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_a \cdot \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - \rho_f \cdot w \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \alpha \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot (T_s(R) - T_f) \quad (4.5)$$

Równanie bilansu energii w fazie stałej

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] \quad (4.6)$$

Warunek brzegowy

$$\lambda_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha \cdot (T_f - T_s) \quad (4.7)$$

gdzie:

— a_s – dyfuzyjność cieplna, m^2/s

$$a_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot c_s} \quad (4.8)$$

4.1 Model matematyczny wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku [26]

Kowalczyk w pracy [26] przedstawił trzy, różniące się szczegółowością opisu przebiegu procesów w obszarze złoża, modele matematyczne wymiennika gruntowego:

I. model jednofazowy

II. model dwufazowy

III. model trójfazowy

Dla każdego z opracowywanych modeli przyjęto następujące założenia:

- obrano kartezjański układ współrzędnych,
- powietrze przepływa tłokowo całym przekrojem złoża w kierunku osi x (lub przeciwnie w przypadku regeneracji złoża),
- faza stała złoża jest ciągła (C – S model),
- stałe ciśnienie powietrza oraz stałe parametry cieplno – fizyczne wszystkich faz,
- pominięto akumulację ciepła w fazie płynnej,
- pole temperatury w otaczającym gruncie opisany jest równaniem przewodzenia ciepła w ośrodku jednorodnym i nieruchomym:

$$a_g \cdot \left[\frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (4.9)$$

gdzie:

- a_g – dyfuzyjność cieplna, m^2/s

$$a_g = \frac{\lambda_g}{\rho_g \cdot c_g} \quad (4.10)$$

- w okresie postoju transport ciepła w złożu opisuje się równaniem, w którym złożo traktuje się jako fazę pseudohomogeniczną o temperaturze T:

$$\lambda_0^e \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.11)$$

I Model jednofazowy.

Jeżeli złożo wymiennika potraktujemy jako fazę pseudohomogeniczną, to otrzymamy kolejny model: model jednofazowy. Przeprowadzone badania wykazały [4, 5], że temperatura płynu i ziarna wypełnienia w danym miejscu różnią się niewiele. Umożliwia to opisanie stanu energetycznego wymiennika za pomocą jednej wielkości – temperatury T fazy pseudohomogenicznej. Przy założeniu występowania w obszarze złoża lokalnej równowagi międzyfazowej, model jednofazowy sformułowany jest następująco [5, 26]:

- okres pracy ze złożem suchym:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_a^e \cdot \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \lambda_r^e \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \rho_f \cdot w_0 \cdot c_f \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.12)$$

- okres pracy ze złożem wilgotnym

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_a^e \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_r^e \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \rho_p \cdot w_0 \cdot \left(c_p + r \cdot \frac{d\bar{X}}{dT} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.13)$$

Ze względu na zbyt małą dokładność modelu jednofazowego Kowalczyk w pracy doktorskiej [26] podjął zadanie opracowania i weryfikacji modelu dwufazowego. Wykazał, że aby poprawić dokładność modelu wymiennika gruntowego, należy uwzględnić higroskopijne własności złoża, modyfikujące ciśnienie cząstkowe pary wodnej przy powierzchni ziaren wypełnienia, oraz wymianę wilgoci z otaczającym gruntem, bowiem zjawiska te wpływają na wymianę masy w wymienniku.

II Model dwufazowy.

Uproszczenia w stosunku do modelu trójfazowego polegają na przyjęciu, że ewentualna woda zwilżająca wypełnienie nie sływa lecz pozostaje zawieszona. Założono również temperatury wypełnienia i wody są takie same. Pominięto dyspersję w powietrzu oraz zdolność akumulacyjną powietrza. W związku z przyjętymi założeniami obszar złoża

traktuje się jako układ dwufazowy złożony z powietrza oraz z wypełnienia pokrytego ewentualnym filmem wodnym powstałym w wyniku kondensacji pary wodnej z powietrza.

Pracę złoźa podzielono na 2 okresy:

— okres pracy ze złoźem suchym:

Równanie bilansu energii w płynie:

$$\rho_f \cdot w_0 \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \alpha \cdot \sigma \cdot (T_s - T_f) = 0 \quad (4.14)$$

Równanie bilansu energii w wypełnieniu

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_o^e \cdot \left[\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right] + \alpha \cdot \sigma \cdot (T_f - T_s) \quad (4.15)$$

— okres pracy ze złoźem wilgotnym:

Równanie bilansu energii w płynie:

$$-\rho_f \cdot w_0 \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \alpha \cdot \sigma \cdot (T_s - T_f) = 0 \quad (4.16)$$

Równanie bilansu energii w wypełnieniu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_o^e \cdot \left[\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right] + \alpha \cdot \sigma \cdot (T_f - T_s) + r \cdot \beta \cdot \sigma \cdot [X - \bar{X}(T_s)] \quad (4.17)$$

Równanie bilansu masy pary wodnej w powietrzu:

$$-\rho_f \cdot w_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial x} + \beta \cdot \sigma \cdot (\bar{X}(T_s) - X) = 0 \quad (4.18)$$

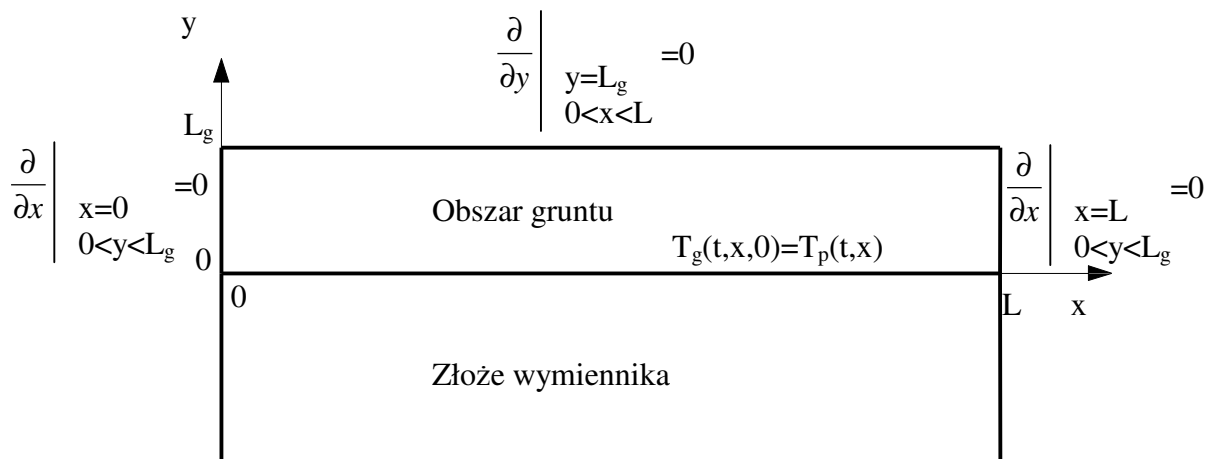
III Model trójfazowy.

Wyróżnia się w nim trzy fazy w obszarze złoźa: stałą, ciekłą i gazową. Założono tu przepływ tłokowy. Przyjęto, że woda, która może się pojawić wyłącznie w wyniku kondensacji pary wodnej z powietrza, spływa po ziarnach złoźa z określoną prędkością. Dla każdej z faz sformułowano równanie bilansu energii. Dodano także równanie opisujące transport masy pary wodnej w powietrzu.

Model ten jest najbardziej złożony, ale w swoim ujęciu jest bardziej teoretyczny, a

także trudny do zastosowania. Wprowadzenie uproszczeń umożliwiło opracowanie bardziej praktycznego modelu dwufazowego.

4.1.1 Dwufazowy model wymiany ciepła i masy w wymienniku gruntowym [26]



Rysunek 16. Wymiennik gruntowy i osie układu współrzędnych

Modelowany obszar przedstawiono na rysunku 16. W obszarze złoźa wymiennika określone są następujące wielkości: $T_s=T_s(t,x)$, $T_p=T_p(t,x)$ ¹, $W=W(t,x)$, $X=X(t,x)$, (dla $t>0$, $0<x<L$). W obszarze gruntu określone są wielkości: $T_g=T_g(t,x,y)$, oraz $V=V(t,x,y)$, (dla $t>0$, $0<x<L$, $0<y<L_g$).

Założenia przyjęte do sformułowania modelu dwufazowego wymiennika gruntowego są następujące:

- tłokowy przepływ powietrza przez złoźe,
- pominięcie akumulacyjności powietrza,
- pominięcie ruchu wody po wypełnieniu,
- uproszczenie obszaru gruntu do warstw bezpośrednio przyległych do ścian złoźa wymiennika,
- doskonałe przemieszanie powietrza w kierunku poprzecznym do jego przepływu,

¹ W dalszej części pracy przyjmuje się, że fazą płynną będzie powietrze, dlatego indeks dolny „f” zastępuje się indeksem dolnym „p”.

- pominięcie oporu wnikania ciepła i masy pary wodnej od powietrza do gruntu,
- pominięcie ruchu pary wodnej w gruncie,
- pominięcie histerezy sorpcji,
- stałe ciśnienie powietrza oraz stałe własności cieplno – fizyczne wszystkich faz,
- pominięcie wymiany ciepła i masy przez górną część złoża wymiennika ze względu na zastosowanie izolacji cieplnej i przeciwwilgociowej.

Dla powyższych założeń model dwufazowy wymiennika gruntowego jest następujący:

Równanie bilansu energii w wypełnieniu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_p - T_s) + r \cdot \beta \cdot \sigma \cdot [X - \bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W)] \quad (4.19)$$

Równanie bilansu masy wody na złożu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial W}{\partial t} = \beta \cdot \sigma \cdot [X - \bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W)] \quad (4.20)$$

Równanie bilansu masy pary wodnej w powietrzu:

$$-\rho_p \cdot w_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial x} + \beta \cdot \sigma \cdot [\bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W) - X] + \frac{2A + B}{AB} \cdot \rho_w \cdot D_g(V) \cdot \frac{\partial V}{\partial y}(t, x, 0) = 0 \quad (4.21)$$

Równanie bilansu energii w powietrzu:

$$-\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial x} + \alpha \cdot \sigma \cdot [T_s - T_p] + \frac{2A + B}{AB} \left[\lambda_g \cdot \frac{\partial T_g}{\partial y}(t, x, 0) - r \cdot \rho_w \cdot D_g(V) \cdot \frac{\partial V}{\partial y}(t, x, 0) \right] = 0 \quad (4.22)$$

Równanie bilansu energii w gruncie:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = a_g \cdot \left[\frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \right] \quad (4.23)$$

Równanie bilansu masy wody w gruncie:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[D_g(V) \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[D_g(V) \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right] \quad (4.24)$$

Warunki początkowe:

$$T_s(0, x) = T^0 \quad (4.25)$$

$$T_p(0, x) = T^0 \quad (4.26)$$

$$W(0, x) = W^0 \quad (4.27)$$

$$X(0, x) = X(T^0) \cdot \varphi(W^0) \quad (4.28)$$

$$T_g(0, x, y) = T^0 \quad (4.29)$$

$$V(0, x, y) = V^0 \quad (4.30)$$

Warunki brzegowe:

$$T_p(t, 0) = T^1(t) \quad (4.31)$$

$$X(t, 0) = X^1(t) \quad (4.32)$$

$$T_g(t, x, 0) = T_p(t, x) \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial y}(t, x, L_g) = 0 \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x}(t, 0, y) = 0 \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x}(t, L, y) = 0 \quad (4.36)$$

$$V(t, x, 0) = V_r(\varphi) \left[\frac{X(t, x)}{X[T_p(t, x)]} \right] \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y}(t, x, L_g) = 0 \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}(t, 0, y) = 0 \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}(t, L, y) = 0 \quad (4.40)$$

Efektywny współczynnik wnikania ciepła α od powietrza do powierzchni ziarna wypełnienia wyznaczono według zależności Jeffresona [21]:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\varepsilon \cdot \lambda_a \cdot \sigma}{(\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p)^2} + (1 + 0.1 \cdot Bi) \cdot \frac{1}{\alpha'} \quad (4.41)$$

gdzie:

$$\sigma = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_z} \quad (4.42)$$

$$Bi = \frac{\alpha' \cdot d_z}{\lambda_s} \quad (4.43)$$

λ_a - współczynnik osiowego przewodzenia ciepła w powietrzu [46]:

$$\lambda_a = \frac{1}{\varepsilon} \cdot (\lambda_0^e + 0.5 \cdot \rho_p \cdot w_0 \cdot c_p \cdot d_z) \quad (4.44)$$

α' - współczynnik wnikania ciepła od powietrza do powierzchni ziarna według korelacji [46]:

$$Nu = 2 + 1.1 \cdot Pr^{0.33} \cdot Re^{0.6} \quad (4.45)$$

$$Nu = \frac{\alpha' \cdot d_z}{\lambda_p} \quad (4.46)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu_p}{\lambda_p} \quad (4.47)$$

$$Re = \frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot d_z}{\mu_p} \quad (4.48)$$

Zależność aproksymująca izotermę sorpcji wody na grysie granitowym:

$$\varphi(W) = 1 - \exp[-1968.2 \cdot (273 + T) \cdot W^{1.97}] \quad (4.49)$$

Zależność opisująca objętościową zawartość wody w gruncie w równowadze z powietrzem o wilgotności względnej φ :

$$V_r(\varphi) = 0.05 \cdot \left[\frac{2 \cdot \varphi}{1 + \varphi} \right]^{2.7} \quad (4.50)$$

Efektywny współczynnik wnikania masy pary wodnej β od powietrza do powierzchni ziarna wypełnienia według zależności Jeffresona, przy pominięciu dyfuzji wewnątrzziarnowej [21]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\varepsilon \cdot D_a \cdot \sigma}{\rho_p \cdot w_0^2} + \frac{1}{\beta'} \quad (4.51)$$

gdzie:

$$\sigma = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_z} \quad (4.52)$$

D_a - współczynnik dyspersji osiowej w powietrzu [46]:

$$D_a = \frac{1}{\varepsilon} \cdot (20 \cdot D_{wp} + 0.5 \cdot w_0 \cdot d_z) \quad (4.53)$$

β' - współczynnik wnikania masy pary wodnej od powietrza do powierzchni ziarna [46]:

$$Sh = 2 + 1.1 \cdot Sc^{0.33} \cdot Re^{0.6} \quad (4.54)$$

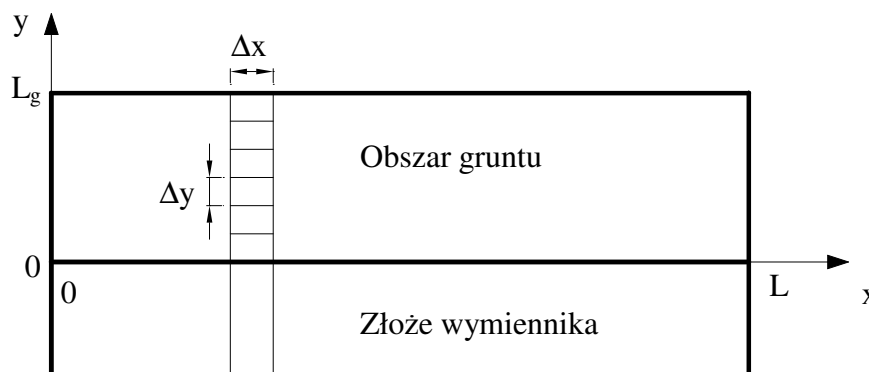
$$Sh = \frac{\beta' \cdot d_z}{\rho_p \cdot D_{wp}} \quad (4.55)$$

$$Sc = \frac{\mu_p}{\rho_p \cdot D_{wp}} \quad (4.56)$$

$$Re = \frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot d_z}{\mu_p} \quad (4.57)$$

4.1.2 Algorytm rozwiązania modelu dwufazowego

Do rozwiązania zagadnienia z rozdziału 4.1.1 zastosowano metodę różnicową. Modelowany obszar złoza wymiennika zdyskretyzowano równoległymi punktami z krokiem przestrzennym Δx – w kierunku osi x , obszar gruntu równoległymi punktami z krokiem przestrzennym Δx – w kierunku osi x oraz Δy – w kierunku osi y (rysunek 17). Punktem dyskretyzacji w płaszczyźnie xy przyporządkowano wskaźniki j,k ($j=0,1,2,\dots,N_h$; $N_h=L/\Delta x$, $k=0,1,2,\dots,N_g$; $N_g=L_g/\Delta y$). Czas procesu zdyskretyzowano równoległymi punktami, z krokiem czasowym Δt . Punktem dyskretyzacji przyporządkowano wskaźniki i ($i=0,1,2,\dots$). Wielkościom określonym na otrzymanej w ten sposób siatce czasoprzestrzennej przyporządkowano wskaźniki i,j,k odpowiadające punktom $(t,x,y)=(i\Delta t, j\Delta x, k\Delta y)$. Pochodne przestrzenne pierwszego rzędu w obszarze złoza przybliżono ilorazem różnicowym wstecz, w obszarze gruntu – ilorazem różnicowym wprzód. Dla pochodnych przestrzennych drugiego rzędu przyjęto iloraz centralny. Pochodną czasową zastąpiono ilorazem różnicowym wprzód. W rezultacie otrzymano jawny algorytm numerycznego rozwiązania zagadnienia:



Rysunek 17. Modelowany obszar oraz siatka różnicowa

dla punktu $j=0, k=0$ otrzymuje się:

- z równania (4.19)

$$T_{i+1,0}^s = T_{i,0}^s + A1 \cdot [T_{i,0}^p - T_{i,0}^s] - B1 \cdot [X_{i,0} - \bar{X}][T_{i,0}^s] \phi[W_{i,0}] \quad (4.58)$$

- z równania (4.20)

$$W_{i+1,0} = W_{i,0} - C1 \cdot [X_{i,0} - \bar{X}[T_{i,0}^s]] \phi[W_{i,0}] \quad (4.59)$$

- z równania (4.32)

$$X_{i+1,0} = X_{i+1}^1 \quad (4.60)$$

- z równania (4.31)

$$T_{i+1,0}^p = T_{i+1}^1 \quad (4.61)$$

- z równania (4.33)

$$T_{i+1,0,0}^g = T_{i+1,0}^p \quad (4.62)$$

- z równania (4.37)

$$V_{i+1,0,0} = V_r \left[\frac{X_{i+1,0}}{\bar{X}[T_{i+1,0}^p]} \right] \quad (4.63)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh$, $k=0$ otrzymuje się:

- z równania (4.19)

$$T_{i+1,j}^s = T_{i,j}^s + A1 \cdot [T_{i,j}^p - T_{i,j}^s] + B1 \cdot [X_{i,0} - \bar{X}[T_{i,0}^s]] \phi[W_{i,0}] \quad (4.64)$$

- z równania (4.20)

$$W_{i+1,j} = W_{i,j} - C1 \cdot [X_{i,0} - \bar{X}[T_{i,0}^s]] \phi[W_{i,0}] \quad (4.65)$$

- z równania (4.21) oraz z warunku (4.37)

$$\begin{aligned} X_{i+1,j} = & D1 \cdot X_{i+1,j-1} + E1 \cdot \bar{X}(T_{i+1,j}^s) \phi(W_{i+1,j}) + \\ & + F1 \cdot D_g \cdot \left[\frac{X_{i+1,j}}{\bar{X}[T_{i+1,j}^p]} \right] \cdot \left[V_{i+1,j,1} - V_r \cdot \left[\frac{X_{i+1,j}}{\bar{X}[T_{i+1,j}^p]} \right] \right] \end{aligned} \quad (4.66)$$

- z równania (4.22) oraz z warunków (4.33) i (4.37)

$$\begin{aligned} T_{i+1,j}^p = & G1 \cdot T_{i+1,j-1}^p + H1 \cdot T_{i+1,j}^s + I1 \cdot T_{i+1,j,1}^g + \\ & + J1 \cdot D_g \cdot \left[\frac{X_{i+1,j}}{\bar{X}[T_{i+1,j}^p]} \right] \cdot \left[V_{i+1,j,1} - V_r \cdot \left[\frac{X_{i+1,j}}{\bar{X}[T_{i+1,j}^p]} \right] \right] \end{aligned} \quad (4.67)$$

- z równania (4.33)

$$T_{i+1,j,0}^g = T_{i+1,j}^p \quad (4.68)$$

- z równania (4.37)

$$V_{i+1,j,0} = V_r \left[\frac{X_{i+1,j}}{\overline{X}[T_{i+1,j}^p]} \right] \quad (4.69)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh-1$, $k=1,2,\dots,Ng-1$ otrzymuje się:

- z równania (4.23)

$$T_{i+1,j,k}^g = T_{i,j,k}^g + A3 \cdot [T_{i,j+1,k}^g - 2 \cdot T_{i,j,k}^g + T_{i,j-1,k}^g] + B3 \cdot [T_{i,j,k+1}^g - 2 \cdot T_{i,j,k}^g + T_{i,j,k-1}^g] \quad (4.70)$$

- z równania (4.24)

$$V_{i+1,j,0} = V_{i,j,k} + C3 \cdot [D_g \cdot (V_{i,j,k} - V_{i,j+1,k}) - D_g \cdot (V_{i,j-1,k} - V_{i,j,k})] + D3 \cdot [D_g \cdot (V_{i,j,k} - V_{i,j,k+1}) - D_g \cdot (V_{i,j,k-1} - V_{i,j,k})] \quad (4.71)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh-1$, $k=Ng$ otrzymuje się:

- z równania (4.34)

$$T_{i+1,j,Ng}^g = T_{i+1,j,Ng-1}^g \quad (4.72)$$

- z równania (4.38)

$$V_{i+1,j,Ng} = V_{i+1,j,Ng-1} \quad (4.73)$$

dla punktów $j=0$, $k=1,2,\dots,Ng$ otrzymuje się:

- z równania (4.35)

$$T_{i+1,0,K}^g = T_{i+1,1,k}^g \quad (4.74)$$

- z równania (4.39)

$$V_{i+1,0,k} = V_{i+1,1,k} \quad (4.75)$$

dla punktów $j=Nh$, $k=1,2,\dots,Ng$ otrzymuje się:

- z równania (4.36)

$$T_{i+1,Nh,K}^g = T_{i+1,Nh-1,k}^g \quad (4.76)$$

- z równania (4.40)

$$V_{i+1,Nh_k} = V_{i+1,Nh-1,k} \quad (4.77)$$

- gdzie:

$$A1 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \Delta t \quad (4.78)$$

$$B1 = \frac{r \cdot \beta \cdot \sigma}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \Delta t \quad (4.79)$$

$$C1 = \frac{\beta \cdot \sigma}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s} \cdot \Delta t \quad (4.80)$$

$$D1 = \frac{\frac{\rho_p \cdot w_0}{\Delta x}}{\frac{\rho_p \cdot w_0}{\Delta x} + \beta \cdot \sigma} \quad (4.81)$$

$$E1 = \frac{\beta \cdot \sigma}{\frac{\rho_p \cdot w_0}{\Delta x} + \beta \cdot \sigma} \quad (4.82)$$

$$F1 = \frac{\rho_p \cdot w_0}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.83)$$

$$G1 = \frac{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x}}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_g}{\Delta y}} \quad (4.84)$$

$$H1 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_g}{\Delta y}} \quad (4.85)$$

$$I1 = \frac{\frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_g}{\Delta y}}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_g}{\Delta y}} \quad (4.86)$$

$$J1 = \frac{\frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{r \cdot \rho_w}{\Delta y}}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot A + B}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_g}{\Delta y}} \quad (4.87)$$

$$A3 = \frac{a_g \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (4.88)$$

$$B3 = \frac{a_g \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \quad (4.89)$$

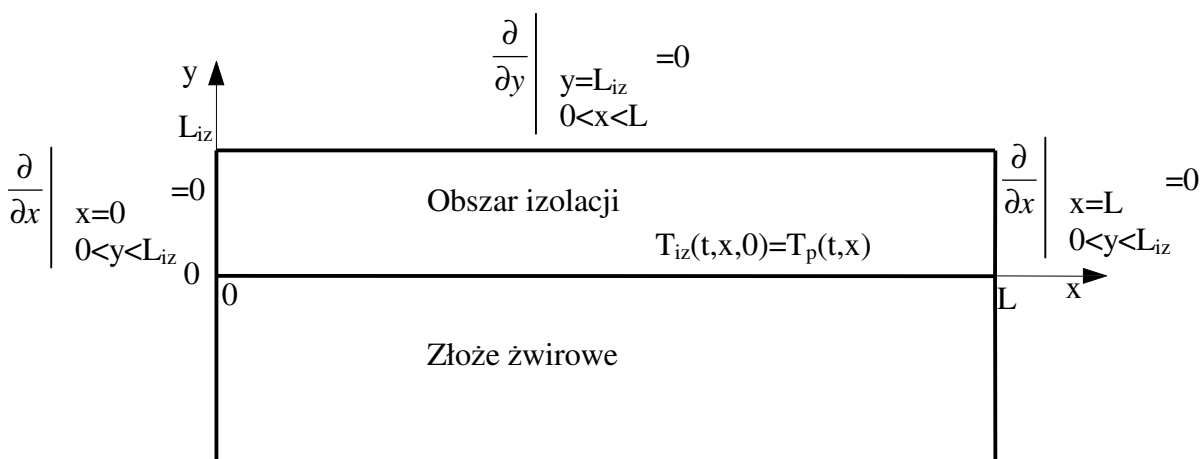
$$C3 = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (4.90)$$

$$D3 = \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \quad (4.91)$$

4.2 Dwufazowy model wymiany ciepła i masy w izolowanym złoź żwirowym

Gryglewicz w pracy [19] do symulacji pracy złoź żwirowego proponuje zastosowanie modelu jednofazowego. Stwierdzić można jednak, że model ten nie jest wystarczająco dokładny do zastosowań inżynierskich. Zaproponowano do opisu zjawisk zachodzących w złoź żwirowym zastosowanie zmodyfikowanego modelu wymiany ciepła i masy opracowanego przez Kowalczyka w pracy [26].

Modelowany obszar złoź przedstawiono na rysunku 18. W obszarze złoź wymiennika określone są następujące wielkości: $T_s=T_s(t,x)$, $T_p=T_p(t,x)$, $W=W(t,x)$, $X=X(t,x)$, (dla $t>0$, $0<x<L$). W obszarze izolacji określone są wielkości: $T_{iz}=T_{iz}(t,x,y)$, (dla $t>0$, $0<x<L$, $0<y<L_{iz}$).



Rysunek 18. Modelowany obszar oraz przyjęte warunki brzegowe

Założenia przyjęte do sformułowania modelu dwufazowego wymiennika gruntowego są następujące:

- tłokowy przepływ powietrza przez złoź,
- pominięcie akumulacyjności powietrza,
- pominięcie ruchu wody po wypełnieniu,
- doskonałe przemieszanie powietrza w kierunku poprzecznym do jego przepływu,

- pominięcie oporu wnikania ciepła od powietrza do izolacji,
- pominięcie histerezy sorpcji,
- stałe ciśnienie powietrza oraz stałe własności cieplno – fizyczne wszystkich faz,
- uwzględniono przenikanie ciepła przez izolację.

Dla powyższych założeń model dwufazowy wymiennika gruntowego jest następujący:

Równanie bilansu energii w wypełnieniu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_p - T_s) + r \cdot \beta \cdot \sigma \cdot [X - \bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W)] \quad (4.87)$$

Równanie bilansu masy wody na złożu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial W}{\partial t} = \beta \cdot \sigma \cdot [X - \bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W)] \quad (4.88)$$

Równanie bilansu masy pary wodnej w powietrzu:

$$0 = -\rho_0 \cdot w_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial x} + \beta \cdot \sigma \cdot [\bar{X}(T_s) \cdot \varphi(W) - X] \quad (4.89)$$

Równanie bilansu energii w powietrzu:

$$0 = -\rho_0 \cdot w_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial x} + \alpha \cdot \sigma \cdot [T_s - T_p] + \frac{2(A+B)}{AB} \cdot \lambda_{iz} \cdot \frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, x, 0) \quad (4.90)$$

Pole temperatur w izolacji:

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial t} = a_{iz} \cdot \left[\frac{\partial^2 T_{iz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{iz}}{\partial y^2} \right] \quad (4.91)$$

Warunki początkowe:

$$T_s(0, x) = T^0 \quad (4.92)$$

$$T_p(0, x) = T^0 \quad (4.93)$$

$$W(0, x) = W^0 \quad (4.94)$$

$$X(0, x) = X(T^0) \cdot \varphi(W^0) \quad (4.95)$$

$$T_{iz}(0, x, y) = T^0 \quad (4.96)$$

Warunki brzegowe:

$$T_p(t, 0) = T^1(t) \quad (4.97)$$

$$X(t, 0) = X^1(t) \quad (4.98)$$

$$T_{iz}(t, x, 0) = T_p(t, x) \quad (4.99)$$

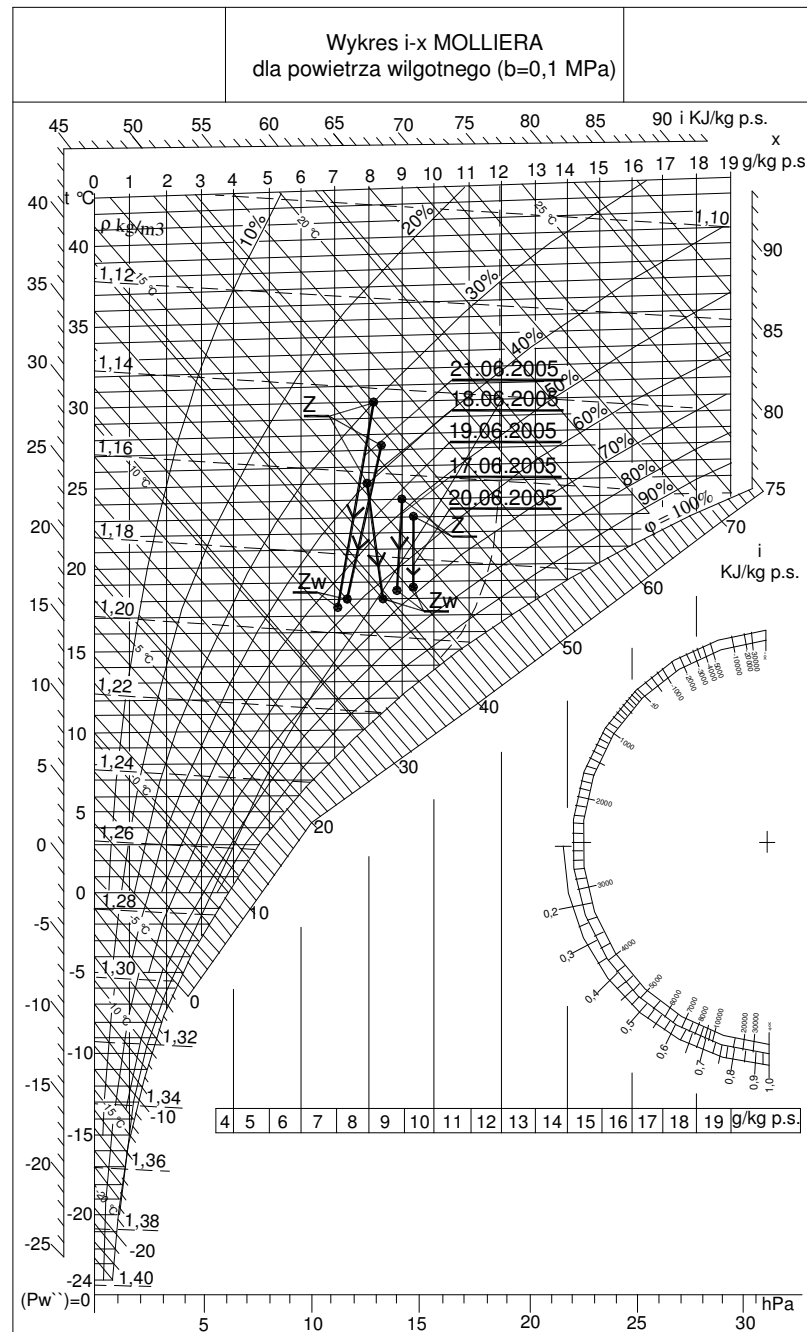
$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, x, L_g) = 0 \quad (4.100)$$

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial x}(t, 0, y) = 0 \quad (4.101)$$

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, L, y) = 0 \quad (4.102)$$

4.3 Model wymiany ciepła w izolowanych źródłach zwirowych

Na rysunku 19 przedstawiono na wykresie i-x przykładowe przemiany jakim podlega powietrze przy przepływie przez izolowane źródło zwirowe.



Rysunek 19. Wykres i-x Molier'a. Przykładowe przemiany powietrza przy przepływie przez izolowane źródło zwirowe. Oznaczenia - Z – parametry powietrza dopływającego do wymiennika; Z_w – parametry powietrza za wymiennikiem

Punkty oznaczone symbolem Z na rysunku 19 odpowiadają temperaturze powietrza na wlocie do źródła zwirowego (czujnik Ctz na rysunku 14). Punkty oznaczone symbolem

Zw odpowiadają temperaturze powietrza opuszczającego złoże żwirowe (czujnik Ct1 na rysunku 14). Analiza wyników badań wykazała, że maksymalna zmiana zawartości wilgoci wyniosła 1,1 g/kg ps (np. przemiany z dnia 18 i 21.06.2005 przedstawione na rysunku 19). W związku z tym do zastosowań inżynierskich zaproponowano nowy, prostszy model wymiany ciepła.

Przyjmując założenia jak w punkcie 4.2 oraz brak wymiany masy w izolowanym złożu żwirowym przy przepływie powietrza, model matematyczny przyjmie następującą postać:

Równanie bilansu energii w wypełnieniu:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_p - T_s) \quad (4.103)$$

Równanie bilansu energii w powietrzu:

$$0 = -\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial x} + \alpha \cdot \sigma \cdot [T_s - T_p] + \frac{2(A+B)}{AB} \cdot \lambda_{iz} \cdot \frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, x, 0) \quad (4.104)$$

Pole temperatur w izolacji:

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial t} = a_{iz} \cdot \left[\frac{\partial^2 T_{iz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{iz}}{\partial y^2} \right] \quad (4.105)$$

Warunki początkowe:

$$T_s(0, x) = T^0 \quad (4.106)$$

$$T_p(0, x) = T^0 \quad (4.107)$$

$$T_{iz}(0, x, y) = T^0 \quad (4.108)$$

Warunki brzegowe:

$$T_p(t, 0) = T^1(t) \quad (4.109)$$

$$T_{iz}(t, x, 0) = T_p(t, x) \quad (4.110)$$

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, x, L_g) = 0 \quad (4.111)$$

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial x}(t, 0, y) = 0 \quad (4.112)$$

$$\frac{\partial T_{iz}}{\partial y}(t, L, y) = 0 \quad (4.113)$$

4.3.1 Algorytm rozwiązania modelu wymiany ciepła

Do rozwiązania zagadnienia z rozdziału 4.3 zastosowano metodę różnicową. Modelowany obszar złoza zwirowego zdyskretyzowano równoległymi punktami z krokiem przestrzennym Δx – w kierunku osi x, obszar izolacji równoległymi punktami z krokiem przestrzennym Δx – w kierunku osi x oraz Δy – w kierunku osi y. Punktom dyskretyzacji w płaszczyźnie xy przyporządkowano wskaźniki j,k ($j=0,1,2,\dots,N_h$; $N_h=L/\Delta x$, $k=0,1,2,\dots,N_{iz}$; $N_{iz}=L_{iz}/\Delta y$). Czas procesu zdyskretyzowano równoległymi punktami, z krokiem czasowym Δt . Punktom dyskretyzacji przyporządkowano wskaźniki i ($i=0,1,2,\dots$). Wielkościom określonym na otrzymanej w ten sposób siatce czasoprzestrzennej przyporządkowano wskaźniki i,j,k odpowiadające punktom $(t,x,y)=(i\Delta t, j\Delta x, k\Delta y)$. Pochodne przestrzenne pierwszego rzędu w obszarze złoza przybliżono ilorazem różnicowym wstecz. Dla pochodnych przestrzennych drugiego rzędu przyjęto iloraz centralny. Pochodną czasową zastąpiono ilorazem różnicowym wprzód. W rezultacie otrzymano jawny algorytm numerycznego rozwiązania zagadnienia:

dla punktu $j=0, k=0$ otrzymuje się:

- z równania (4.103)

$$T_{i+1,0}^s = T_{i,0}^s + A1 \cdot [T_{i,0}^p - T_{i,0}^s] \quad (4.114)$$

- z równania (4.109)

$$T_{i+1,0}^p = T_{i+1}^l \quad (4.115)$$

- z równania (4.110)

$$T_{i+1,0,0}^{iz} = T_{i+1,0}^p \quad (4.116)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh$, $k=0$ otrzymuje się:

- z równania (4.103)

$$T_{i+1,j}^s = T_{i,j}^s + A1 \cdot [T_{i,j}^p - T_{i,j}^s] \quad (4.117)$$

- z równania (4.104) oraz z warunku (4.110)

$$T_{i+1,j}^p = G1 \cdot T_{i+1,j-1}^p + H1 \cdot T_{i+1,j}^s + I1 \cdot T_{i+1,j,1}^{iz} \quad (4.118)$$

- z równania (4.110)

$$T_{i+1,j,0}^{iz} = T_{i+1,j}^p \quad (4.119)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh-1$, $k=1,2,\dots,Niz-1$ otrzymuje się:

- z równania (4.105)

$$T_{i+1,j,k}^{iz} = T_{i,j,k}^{iz} + A3 \cdot [T_{i,j+1,k}^{iz} - 2 \cdot T_{i,j,k}^{iz} + T_{i,j-1,k}^{iz}] + B3 \cdot [T_{i,j,k+1}^{iz} - 2 \cdot T_{i,j,k}^{iz} + T_{i,j,k-1}^{iz}] \quad (4.120)$$

dla punktów $j=1,2,\dots,Nh-1$, $k=Niz$ otrzymuje się:

- z równania (4.111)

$$T_{i+1,j,Ng}^{iz} = T_{i+1,j,Ng-1}^{iz} \quad (4.121)$$

dla punktów $j=0$, $k=1,2,\dots,Niz$ otrzymuje się:

- z równania (4.112)

$$T_{i+1,0,k}^{iz} = T_{i+1,1,k}^{iz} \quad (4.122)$$

- z równania (4.113)

$$T_{i+1,Nh,k}^{iz} = T_{i+1,Nh-1,k}^{iz} \quad (4.123)$$

- gdzie:

$$A1 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \Delta t \quad (4.124)$$

$$G1 = \frac{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x}}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot (A + B)}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_{iz}}{\Delta y}} \quad (4.125)$$

$$H1 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot (A+B)}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_{iz}}{\Delta y}} \quad (4.126)$$

$$I1 = \frac{\frac{2 \cdot (A+B)}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_{iz}}{\Delta y}}{\frac{\rho_p \cdot w_0 \cdot c_p}{\Delta x} + \alpha \cdot \sigma + \frac{2 \cdot (A+B)}{A \cdot B} \cdot \frac{\lambda_{iz}}{\Delta y}} \quad (4.127)$$

$$A3 = \frac{a_{iz} \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (4.128)$$

$$B3 = \frac{a_{iz} \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \quad (4.129)$$

5 Weryfikacja modeli matematycznych

Do oceny dokładności modelu gruntowego wymiennika ciepła posłużono się dwiema wielkościami:

- Średnim modulem różnicy temperatur między wartością wyznaczoną z modelu a wartością zmierzoną

$$|\Delta T|_{\text{sr}} = \frac{1}{d} \cdot \sum_{n=1}^d \left[\frac{1}{h} \sum_{i=1}^h |T_{n,i}^{\text{mod el}} - T_{n,i}^{\text{pomiar}}| \right]$$

- Maksymalnym modulem różnicy temperatur między wartością wyznaczoną z modelu a wartością zmierzoną

$$|\Delta T|_{\text{max}} = \max_{n,i} \cdot |T_{n,i}^{\text{mod el}} - T_{n,i}^{\text{pomiar}}|$$

gdzie:

- i – kolejne godziny pracy układu,
- h – czas pracy układu,
- n – kolejne dni,
- d – liczba dni,
- $T_{n,i}^{\text{mod el}}, T_{n,i}^{\text{pomiar}}$ – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik odpowiednio wyznaczona z modelu matematycznego oraz zmierzona.

5.1 Weryfikacja modelu wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku

W celu wykonania obliczeń według przedstawionego w rozdziale 4.1.1 modelu matematycznego opracowanego przez Kowalczyka [26] przygotowano program komputerowy w języku kompilatora Visual Basic. Przyjęte założenia odnośnie parametrów fizycznych powietrza, wypełnienia i gruntu zestawiono w tabeli 5. Temperaturami wejściowymi były: w cyklu I – temperatura powietrza napływającego na złożę Treg, mierzona czujnikiem Ct2; w cyklu II – temperatura powietrza zewnętrznego Tz, mierzona czujnikiem Ct1.

Tabela 5. Charakterystyka wymiennika gruntowego oraz przyjęte założenia.

* Dane z okresu listopad 2003 – marzec 2004

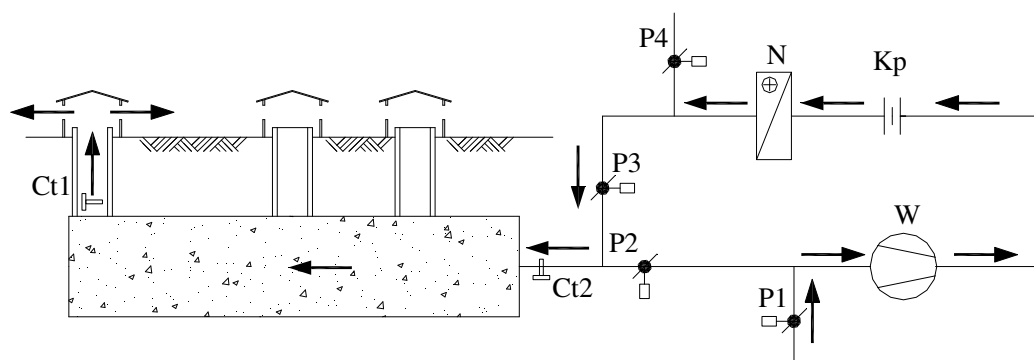
** Dane z okresu październik 2004 – marzec 2005

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry wymiennika	Wysokość złoża,	A	0,7	m
	Szerokość złoża,	B	0,7	m
	Długość złoża	L	5,0	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,14 0,12*	m/s
	Strumień powietrza	V	247 212*	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża (grys granitowy 10/20 mm)	Średnica zastępcza	d_z	13,4	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,42	-
	Gęstość	ρ_s	2680	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	815	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,243	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg
Parametry powietrza w temperaturze 20° C	Ciśnienie powietrza	p	1013*10 ⁵	Pa
	Ciepło właściwe	c_p	1,005	J/(kg*K)
	Gęstość	ρ_p	1,205	kg/m ³
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_p	0,0259	W/(m*K)
	Współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu	D_{wp}	2,45*10 ⁻⁵	m ² /s
	Dynamiczny współczynnik lepkości	μ_p	18,1*10 ⁻⁶	N*s/m
Inne parametry	Ciepło parowania wody	r	2500,8*10 ³	J/kg
	Szerokość warstwy gruntu	Lg	2,0	m
	Długość kroków przestrzennych:	Δx	0,1	m
		Δy	0,1	m
	Długość kroku czasowego	Δt	10	s

Na rysunku 22 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji i pomiarów z dnia 04.03.2004 roku. Całodobowy cykl podzielono na 2 cykle:

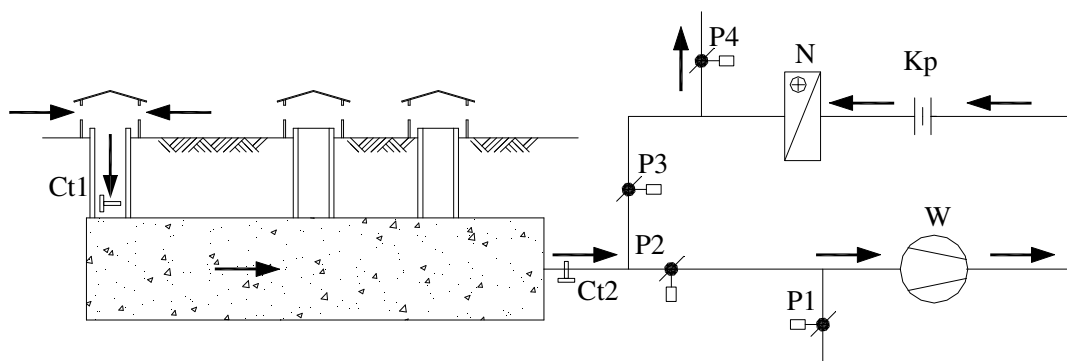
- Cykl I – regeneracja wymiennika gruntowego. Powietrze czerpane z pomieszczenia nagrzewane było do temperatury około 20°C (T_{reg}) i nawiewane na wypełnienie wymiennika. Układ pomiarowy nie był wyposażony w automatykę umożliwiającą utrzymywanie stałej temperatury powietrza za nagrzewnicą. W związku z tym temperatura T_{reg} zależała bezpośrednio od temperatury powietrza w laboratorium i wahała się w granicach $20 - 23^{\circ}\text{C}$. Temperatura powietrza regenerującego T_{reg} mierzona była czujnikiem Ct2 (Rysunek 20), natomiast temperatura powietrza opuszczającego wymiennik (T_1) – czujnikiem Ct1.

W cyklu I na pomiar temperatury powietrza opuszczającego wymiennik (czujnik Ct1, rysunek 20) wpływały ruchy konwekcyjne powietrza w kanale doprowadzającym powietrze do złoża wymiennika. Dlatego na rysunkach przedstawiono jedynie temperaturę powietrza opuszczającego wymiennik (T_2) wyznaczoną na podstawie symulacji.

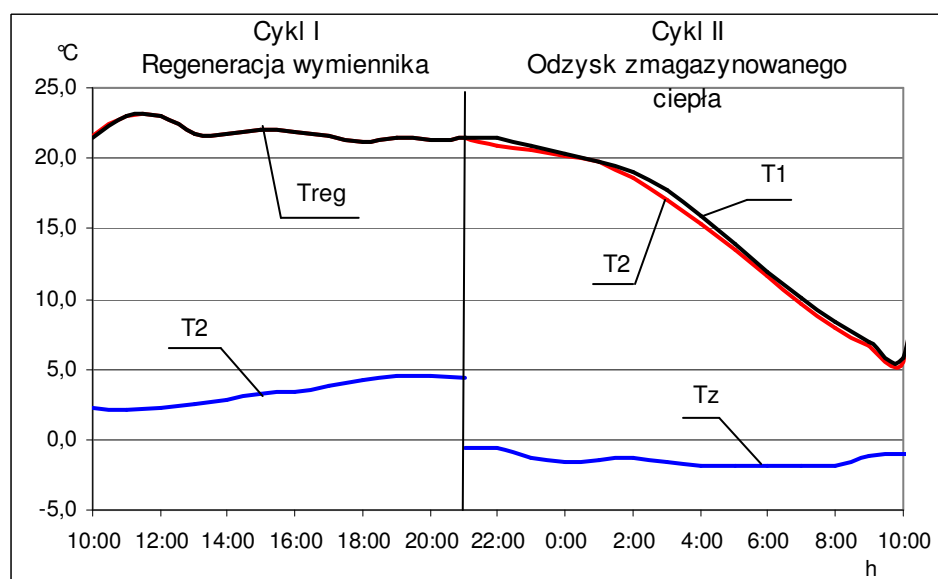


Rysunek 20. Schemat pracy badanego układu: Cykl I – ładowanie wymiennika. Oznaczenia: P1, P2, P3, P4 – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct1 i Ct2 – czujniki temperatury

- Cykl II – odzysk zmagazynowanego ciepła. Powietrze zewnętrzne o temperaturze T_z (mierzonej czujnikiem Ct1, rysunek 21) przepływało przez zregenerowane złożo wymiennika i ogrzewało się do temperatury T_1 (mierzonej czujnikiem Ct2, rysunek 21). Na wykresie naniesiono temperaturę powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczoną z modelu (T_2).



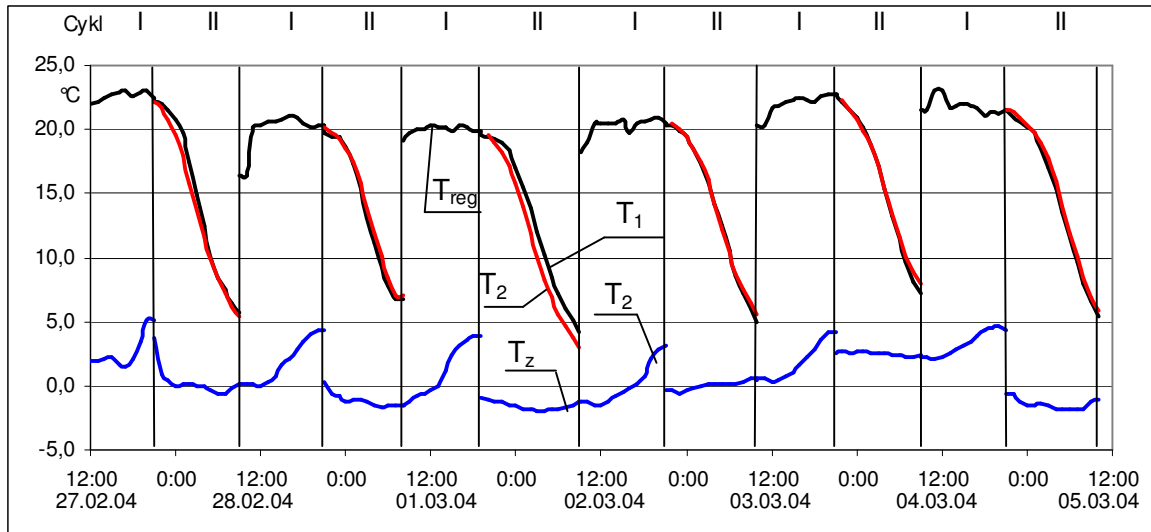
Rysunek 21. Schemat pracy badanego układu: Cykl II – odzysk zmagazynowanego ciepła. Oznaczenia: P1, P2, P3, P4 – przepustnice; N – nagrzewnica elektryczna; Kp – kryza pomiarowa; W – wentylator; Ct1 i Ct2 – czujniki temperatury



Rysunek 22: Wyniki symulacji i pomiarów z dnia 4.03.2004 r. Oznaczenia: Treg – temperatura powietrza nawiewanego na złożo wymiennika w czasie regeneracji wymiennika; T1 – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik; T2 – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej; Tz – temperatura powietrza zewnętrznego

Na rysunkach 23 i 24 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów oraz symulacji komputerowej dla okresów 27.02.2004 – 05.03.2004 oraz 10.02.2005 – 15.02.2005. Linie pionowe przedstawiają moment przełączania układu.

W okresie 27.02.2004 – 05.03.2004 przełączanie układu następowało manualnie. Dlatego też czas ładowania i rozładowania wymiennika nie wynosił dokładnie 12 godzin. Dla takich warunków przeprowadzono symulację komputerową.

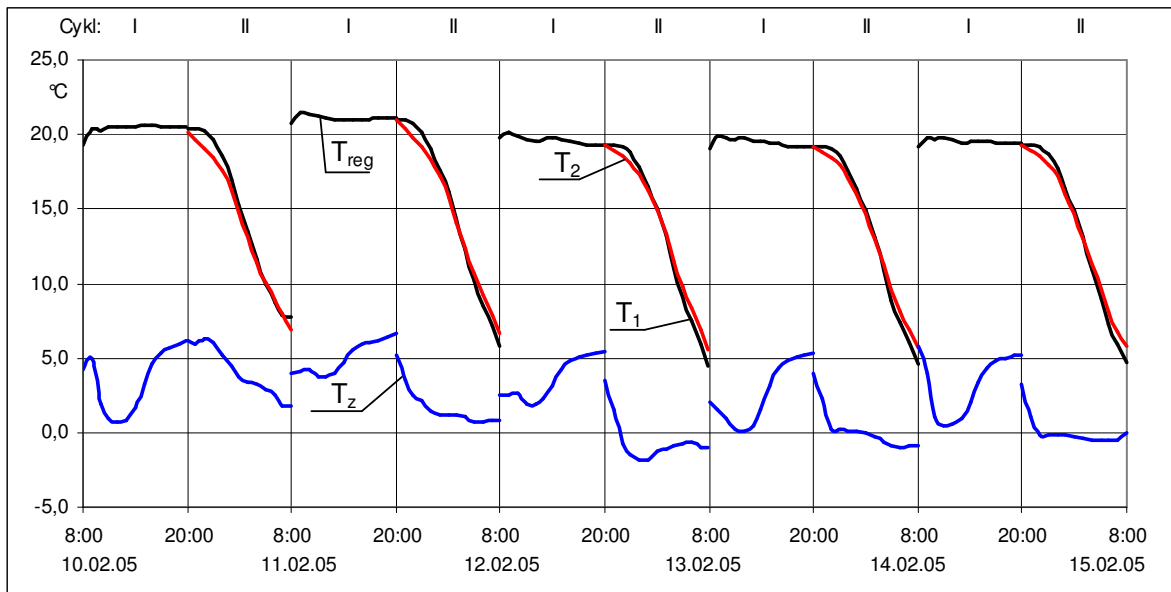


Rysunek 23: Wyniki symulacji i pomiarów z okresu 27.02.2004 - 05.03.2004 r. Oznaczenia:
T_{reg} – temperatura powietrza nawiewanego na złożę wymiennika w czasie regeneracji wymiennika;
T₁ – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik; *T₂* – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej; *T_z* – temperatura powietrza zewnętrznego

Porównując temperatury powietrza opuszczającego wymiennik (*T₁* i *T₂*) średni oraz maksymalny moduł różnicy temperatur w okresie 27.02.2004 – 05.03.2004 wyniósł:

$$|\Delta T|_{sr} = 0,6 \text{ K}$$

$$|\Delta T|_{max} = 2,0 \text{ K}$$



Rysunek 24: Wyniki symulacji i pomiarów z dnia 10.02.2005 - 15.02.2005 r. Oznaczenia: T_{reg} – temperatura powietrza nawiewanego na złożę wymiennika w czasie regeneracji wymiennika; T_1 – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik; T_2 – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej; T_z – temperatura powietrza zewnętrznego

Dla okresu 10.02.2005 – 15.02.2005 średni oraz maksymalny moduł różnicy temperatur (T_1 i T_2) wyniósł:

$$|\Delta T|_{\text{sr}} = 0,5 \text{ K}$$

$$|\Delta T|_{\text{max}} = 1,2 \text{ K}$$

5.2 Weryfikacja modelu wymiany ciepła w izolowanych złoźach zwirowych

Na podstawie opracowanego modelu wymiany ciepła w izolowanych złoźach zwirowych, opisanego w rozdziale 4.3, przygotowano program komputerowy w języku kompilatora Visual Basic. Program ten posłużył do symulacji pracy izolowanych złoź zwirowych.

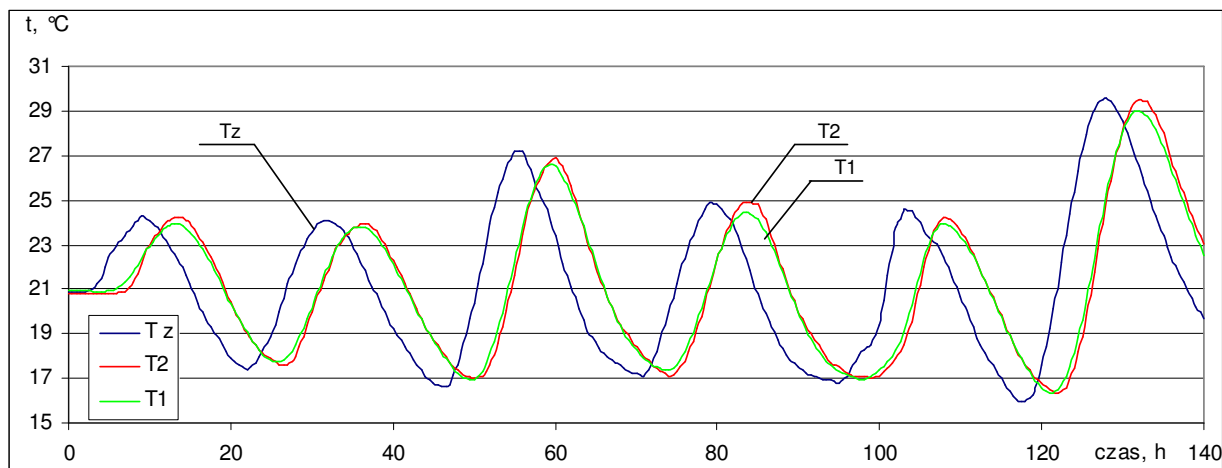
5.2.1 Symulacja pracy złoźa nr 1

Przyjęte założenia odnośnie parametrów fizycznych powietrza i wypełnienia zestawiono w tabeli 6. Strumień powietrza przepływającego przez złoź był stały. Kierunek przepływu zgodny z rysunkiem nr 14. Temperaturą wejściową w symulacji była temperatura powietrza zewnętrznego mierzona czujnikiem Ctz (Rysunek 14). Temperaturę powietrza opuszczającego wymiennik (T1) mierzono czujnikiem Ct1.

Tabela 6. Charakterystyka złoźa zwirowego nr 1

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry wymiennika nr 1	Wysokość złoźa	A	1,0	m
	Szerokość złoźa,	B	1,0	m
	Długość złoźa	L	4,0	m
	Prędkość napływu powietrza	w_0	0,07	m/s
	Strumień powietrza	V	252	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoźa (zwiąir)	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoźa bez przepływu powietrza	λ_0^c	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg
Parametry powietrza w temperaturze 20° C	Ciśnienie powietrza	p	1013*10 ⁵	Pa
	Ciepło właściwe	C_p	1,005	J/(kg*K)
	Gęstość	ρ_p	1,205	kg/m ³
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_p	0,0259	W/(m*K)
	Współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu	D_{wp}	2,45*10 ⁻⁵	m ² /s
	Dynamiczny współczynnik lepkości	μ_p	18,1*10 ⁻⁶	N*s/m
Inne parametry	Ciepło parowania wody	r	2500,8*10 ³	J/kg
	Długość kroków przestrzennych:	Δx	0,1	m
		Δy	0,02	m
	Długość kroku czasowego	Δt	10	s

Na rysunku 25 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów oraz symulacji komputerowej dla okresu 18.06.2005 – 23.06.2005.



Rysunek 25: Wyniki symulacji i pomiarów z okresu 18.06.2005 – 23.06.2005 r. Oznaczenia: T1 – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik; T2 – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej; Tz – temperatura powietrza zewnętrznego

Dla okresu 18.06.2005 – 23.06.2005 średni oraz maksymalny moduł różnicy temperatur (T1 i T2) wyniósł:

$$|\Delta T|_{\text{sr}} = 0,2 \text{ K}$$

$$|\Delta T|_{\text{max}} = 0,8 \text{ K}$$

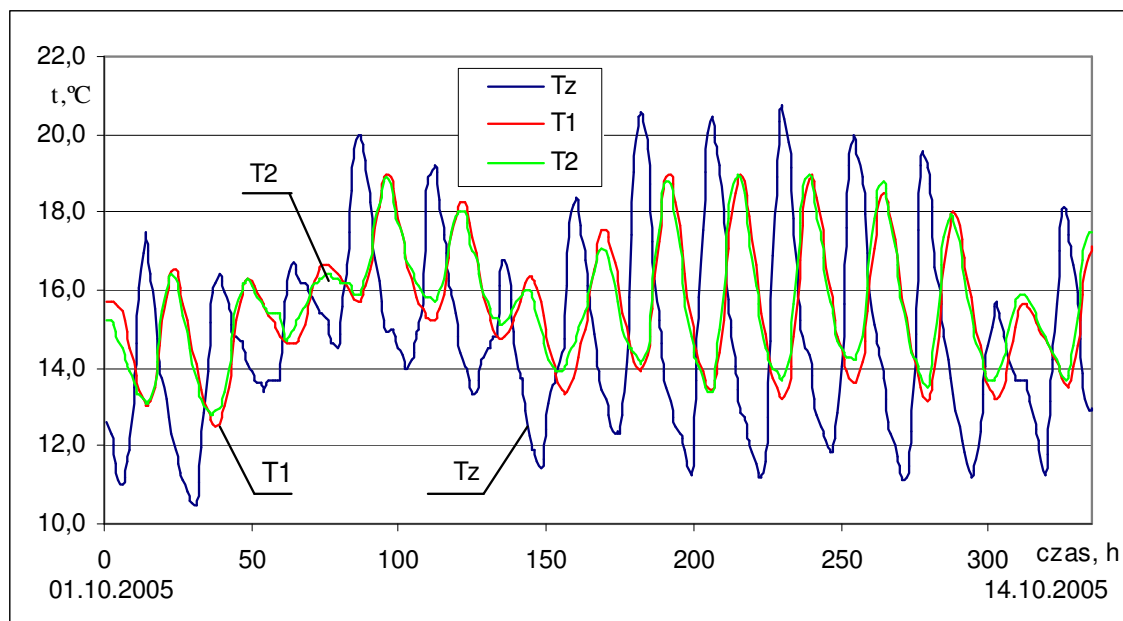
5.2.2 Symulacja pracy złoża nr 2

Przyjęte założenia odnośnie parametrów fizycznych powietrza i wypełnienia zestawiono w tabeli 7. Strumień powietrza przepływającego przez złożo był stały. Kierunek przepływu zgodny z rysunkiem nr 15. Temperaturą wejściową w symulacji była temperatura powietrza zewnętrznego mierzona czujnikiem Ctz (Rysunek 15). Temperaturę powietrza opuszczającego wymiennik (T1) mierzono czujnikiem Ct1.

Tabela 7. Charakterystyka złoża żwirowego nr 2

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry wymiennika nr II	Wysokość złoża,	A	0,36	m
	Szerokość złoża,	B	0,6	m
	Długość złoża	L	1,92	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,10	m/s
	Strumień powietrza	V	78	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża (żwir)	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg
Parametry powietrza w temperaturze 20° C	Ciśnienie powietrza	p	1013*10 ⁵	Pa
	Ciepło właściwe	C_p	1,005	J/(kg*K)
	Gęstość	ρ_p	1,205	kg/m ³
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_p	0,0259	W/(m*K)
	Współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu	D_{wp}	2,45*10 ⁻⁵	m ² /s
	Dynamiczny współczynnik lepkości	μ_p	18,1*10 ⁻⁶	N*s/m
Inne parametry	Ciepło parowania wody	r	2500,8*10 ³	J/kg
	Długość kroków przestrzennych:	Δx	0,1	m
		Δy	0,02	m
	Długość kroku czasowego	Δt	10	s

Na wykresie 26 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów oraz symulacji komputerowej dla okresu 01.10.2005 – 14.10.2005.



Rysunek 26. Wyniki symulacji i pomiarów z okresu 01.10.2005 – 14.10.2005 r. Oznaczenia: T1 – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik; T2 – temperatura powietrza opuszczającego wymiennik wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej; Tz – tempera powietrza zewnętrznego

Dla okresu 01.10.2005 – 14.10.2005 średni oraz maksymalny moduł różnicy temperatur (T1 i T2) wyniósł:

$$|\Delta T|_{\text{sr}} = 0,3 \text{ K}$$

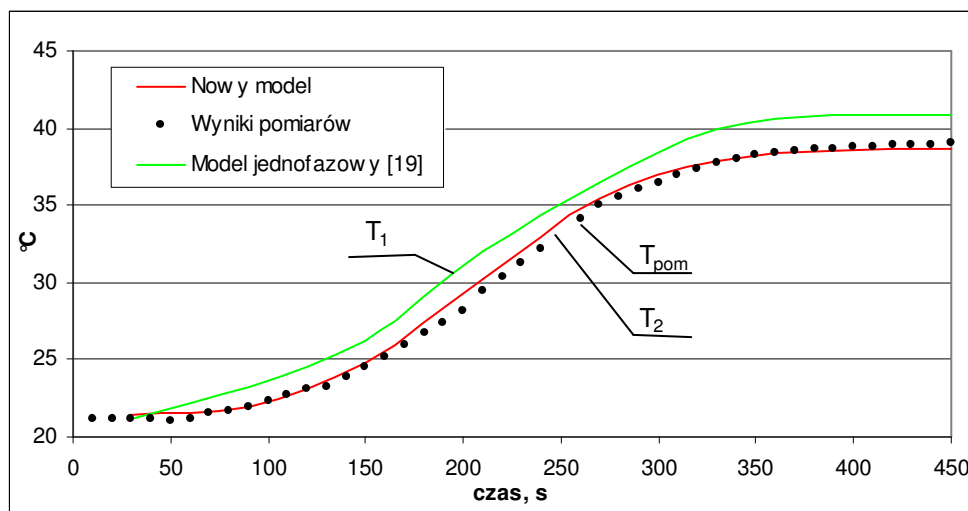
$$|\Delta T|_{\text{max}} = 1,0 \text{ K}$$

5.3 Porównanie jednofazowego modelu wymiany ciepła i masy [19] oraz nowego modelu wymiany ciepła w izolowanych złożach żwirowych

W celu porównania opracowanego modelu wymiany ciepła z modelem jednofazowym opracowanym przez Gryglewicza wykonano symulację pracy izolowanego złoża żwirowego. Wykorzystano tu wyniki badań przedstawione w pracy [19]. Symulację przeprowadzono dla następujących warunków:

- prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża $w_0=0,17$ m/s,
- temperatura powietrza napływającego na złożo $T_{wej}=40,9$ °C.

Na rysunku 27 przedstawiono wyniki pomiarów (T_{pom}), temperaturę powietrza za wymiennikiem wyznaczoną z modelu jednofazowego i modelu wymiany ciepła (odpowiednio T_1 i T_2).



Rysunek 27. Porównanie modelu jedno- i dwufazowego. Oznaczenia: T_{pom} – zmierzona temperatura powietrza opuszczającego wymiennik, T_1 – temperatura wyznaczona z modelu jednofazowego [19], T_2 – temperatura wyznaczona z nowego modelu wymiany ciepła

Dla przedstawionego przykładu średni oraz maksymalny moduł różnicy temperatur wyniósł:

- w modelu jednofazowym [19] (T_1 i T_{pom}):

$$|\Delta T|_{\text{sr}} = 1,7 \text{ K}$$

$$|\Delta T|_{\text{max}} = 2,5 \text{ K}$$

— w opracowanym modelu wymiany ciepła (T_2 i T_{pom}):

$$|\Delta T|_{sr} = 0,3 \text{ K}$$

$$|\Delta T|_{max} = 0,7 \text{ K}$$

Z przeprowadzonego porównania wynika, że opracowany model wymiany ciepła w izolowanym złożu żwirowym znacznie lepiej odwzorowuje pracę wymiennika.

6 Analiza pracy systemów wentylacyjnych z zastosowaniem wymiennika gruntowego oraz izolowanego złoża żwirowego

Aby wykonać analizę energetyczną stosowania opisanych źródeł energii niezbędna jest znajomość charakterystyki cieplnej budynku, w którym mają być zastosowane. Obliczenia obciążenia cieplnego przykładowego pomieszczenia wykonane zostały w programie EnergyPlus V1.2.1 [44]. Na podstawie wyników obliczeń oraz stworzonych programów komputerowych symulujących pracę wymienników gruntowych oraz izolowanych źródeł żwirowych przeprowadzona została analiza energetyczna.

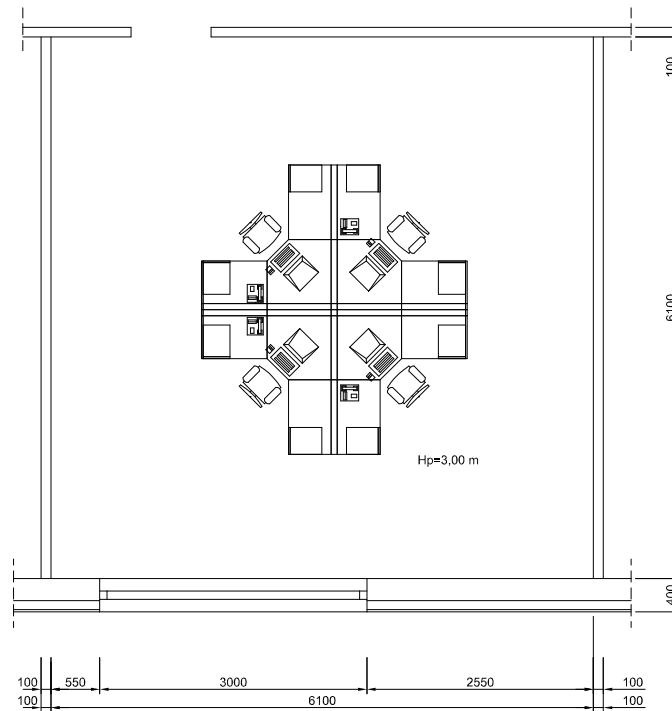
Analizę przeprowadzono dla 4 miast Polski: Poznania, Kołobrzegu, Warszawy oraz Krakowa. Wykorzystano tu dane meteorologiczne roku reprezentatywnego dla tych miast, udostępnione wraz z programem EnergyPlus. Rok reprezentatywny wyznaczono metodą ASHRAE na podstawie pomiarów z lat 1982-1999.

6.1 Analiza obciążenia cieplnego przykładowego pomieszczenia

Na rysunku 28 przedstawiono rzut przykładowego pomieszczenia dla którego wykonano symulację.

Dane konstrukcyjne przegród:

- Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej, $U_{sc} = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,
- Konstrukcja ściany zewnętrznej:
 - 2 x tynk, $\lambda_{\text{tynk}} = 1,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,
 - Styropian, $\lambda_{\text{styropian}} = 0,043 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, o grubości $d=12 \text{ cm}$,
 - Bloczki gazobetonowe, $\lambda_{\text{bl}} = 0,25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, o grubości $d=25\text{cm}$,
- Współczynnik przenikania ciepła okna, $U_{ok} = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,
- W obliczeniach uwzględniono bezwładność cieplną przegród budowlanych,
- Nie przewidziano przesłon przeciwsłonecznych,
- Wymiary zgodnie z rysunkiem 26.



Rysunek 28. Rzut analizowanego pomieszczenia

Przyjęte założenia:

- Pomieszczenie znajduje się na kondygnacji pośredniej,
- Pomieszczenie jest użytkowane od poniedziałku do piątku w godzinach 8-18,
- W godzinach 18-8 układ wentylacyjny zapewnia 1-krotną wymianę powietrza w pomieszczeniu,
- W pomieszczeniu utrzymywana jest temperatura w zakresie 20-25°C przez układ wentylacyjny,
- Chwilową temperaturę pomieszczenia wyznaczono z zależności :

$$T_{poc} = \frac{T_{poz} + T_{zoc}}{2}$$

gdzie:

- T_{poc} – chwilowa temperatura pomieszczenia w okresie ciepłym;
- T_{poz} – temperatura pomieszczenia w okresie zimnym,
- T_{zoc} – chwilowa temperatura powietrza zewnętrznego okresu ciepłego.

- Układ centralnego ogrzewania utrzymuje temperaturę dyżurną 15°C w godzinach 18-8,
- W sąsiadujących pomieszczeniach utrzymywana jest temperatura taka jak w analizowanym pomieszczeniu (wymiana ciepła odbywa się wyłącznie przez przegrodę zewnętrzną),
- W pomieszczeniu pracują 4 osoby,
- Zyski ciepła od oświetlenia: 600 W,
- Wyposażenie elektryczne posiada moc 800 W,

Symulację przeprowadzono dla całego roku reprezentatywnego 4 następujących miast: Poznań, Kołobrzeg, Warszawa, Kraków, przy czym wyniki z okresu październik – kwiecień wykorzystano do analizy pracy układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego. Natomiast wyniki z okresu maj – wrzesień do analizy układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoza zwirowego.

6.2 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego

Schemat układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem dwu naprzemiennie pracujących wymienników gruntowych oraz z regeneracją wymienników przedstawiono na rysunkach 29 i 30.

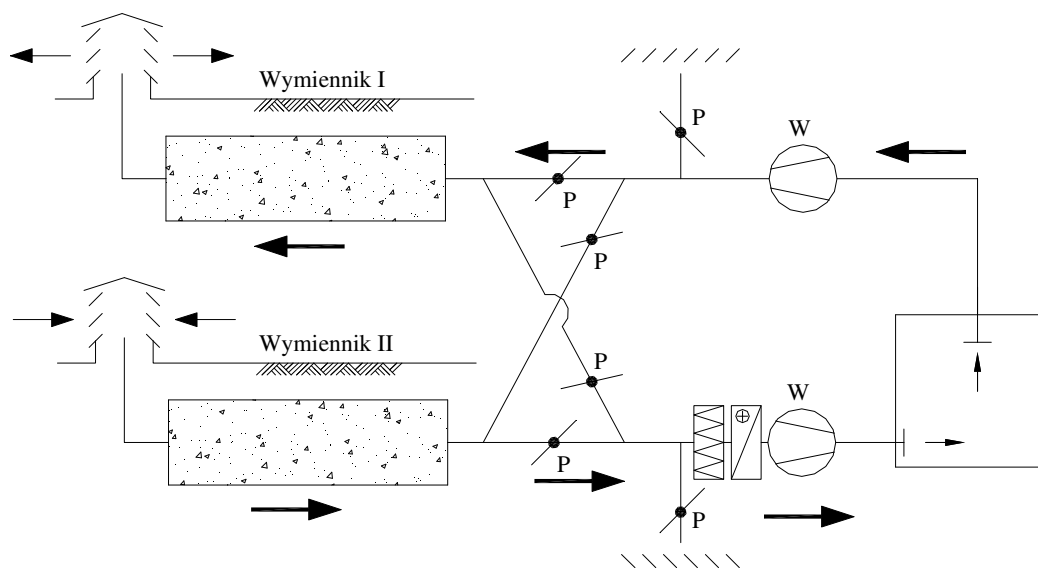
Założenia przyjęte do analizy:

- Założenia do obliczeń obciążenia cieplnego pomieszczenia opisano w rozdziale 6.1,
- Maksymalne zyski ciepła, przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz przyjęty strumień powietrza wentylującego zestawiono w tabeli nr 8,
- Układ wentylacji pracuje w godzinach 8–18,
- W godzinach 18-8 układ wentylacyjny zapewnia 1-krotną wymianę powietrza w pomieszczeniu,
- Instalacja wentylacyjna wyposażona jest w układ automatycznej regulacji,
- Obliczenia wykonano dla okresu październik – kwiecień.

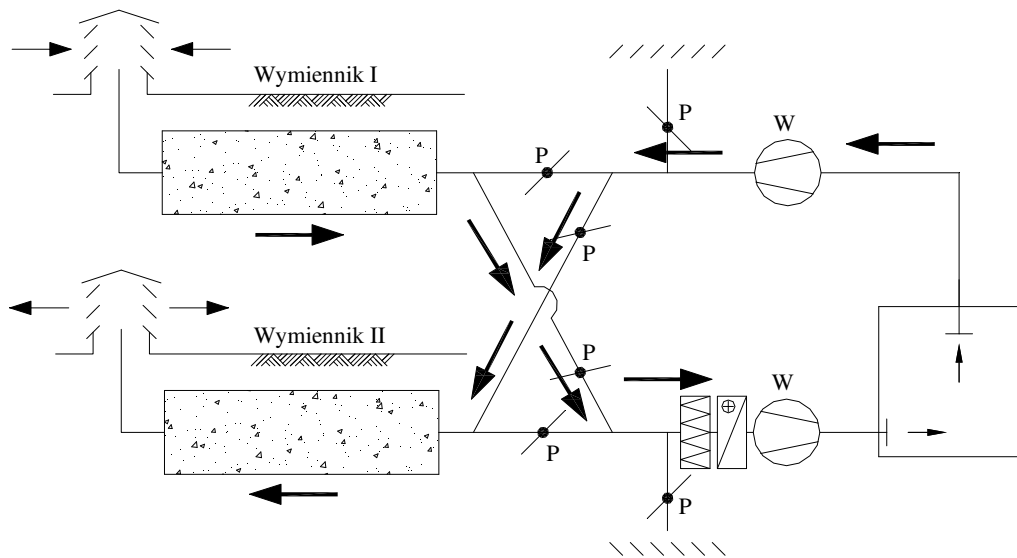
Tabela 8. Maksymalne zyski ciepła, przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz przyjęty strumień powietrza wentylującego

	Poznań	Kołobrzeg	Warszawa	Kraków
Maksymalne zyski ciepła całkowitego	1900 W	1740 W	1850 W	1880 W
Przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu	8,0 K	8,0 K	8,0 K	8,0 K
Strumień powietrza wentylującego	570 m ³ /h	520 m ³ /h	560 m ³ /h	560 m ³ /h

Powietrze usuwane z pomieszczenia ogrzewa wypełnienie wymiennika nr 1. Powietrze zewnętrzne przepływa przez wymiennik nr 2. Po 12 godzinach następuje przełączenie instalacji. Powietrze zewnętrzne ogrzewa się w wymienniku nr 1, natomiast powietrze z pomieszczenia przepływa przez wymiennik 2. (Rysunki 29 i 30).

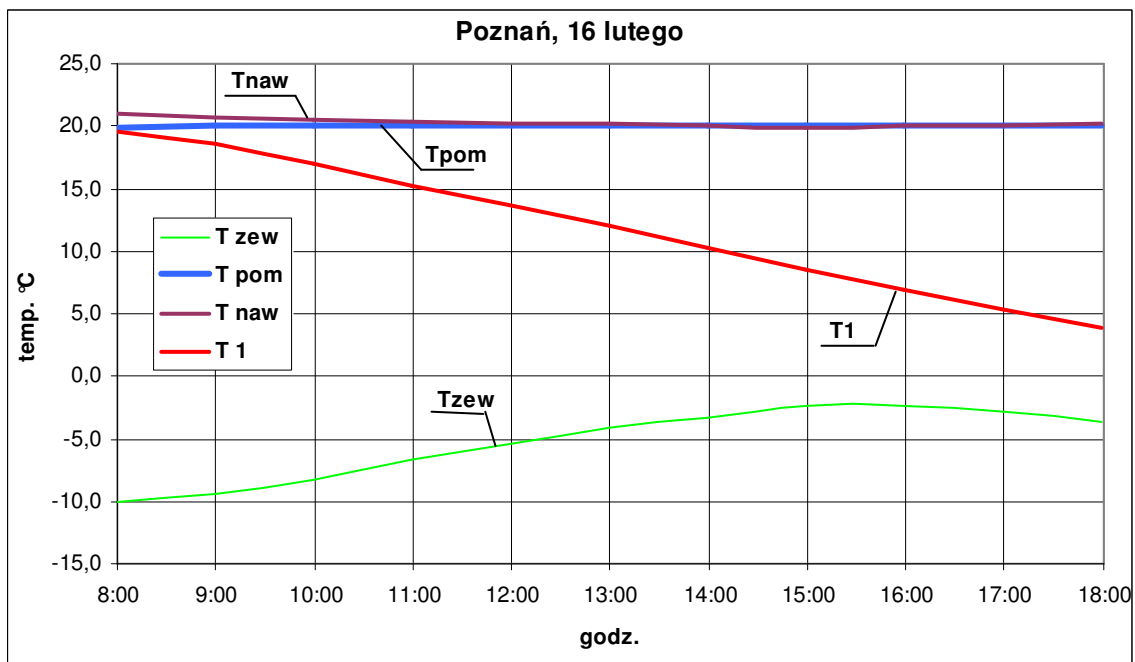


Rysunek 29. Schemat układu uzdatniania powietrza z dwoma naprzemiennie pracującymi wymiennikami.
Cykl I – regeneracja wymiennika nr I.

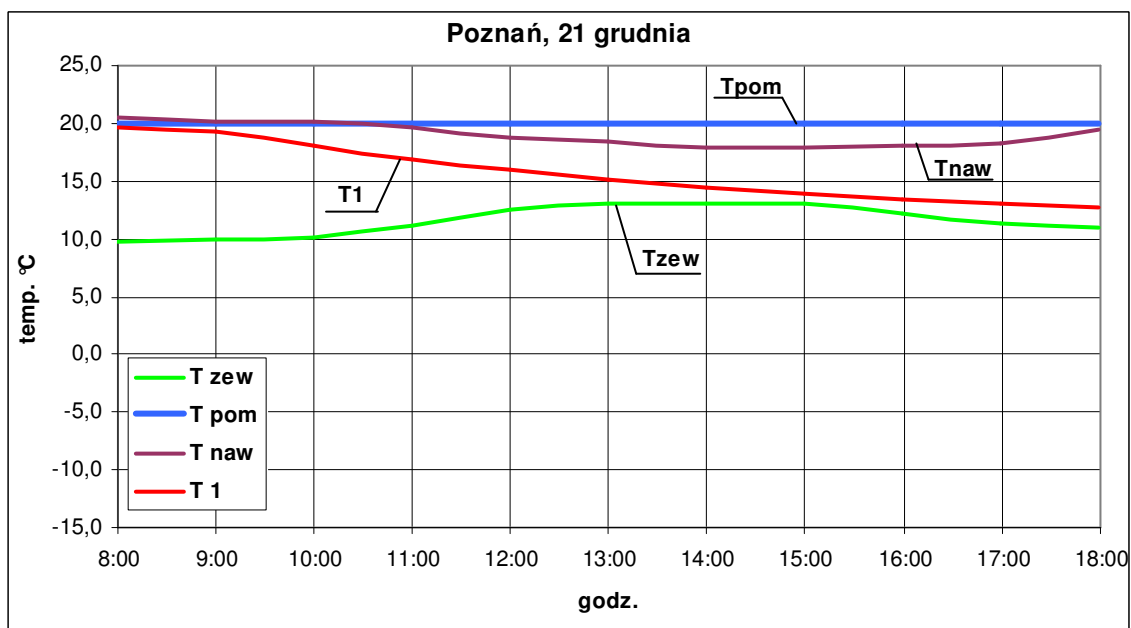


Rysunek 30. Schemat układu uzdatniania powietrza z dwoma naprzemiennie pracującymi wymiennikami.
Cykl II – regeneracja wymiennika nr II.

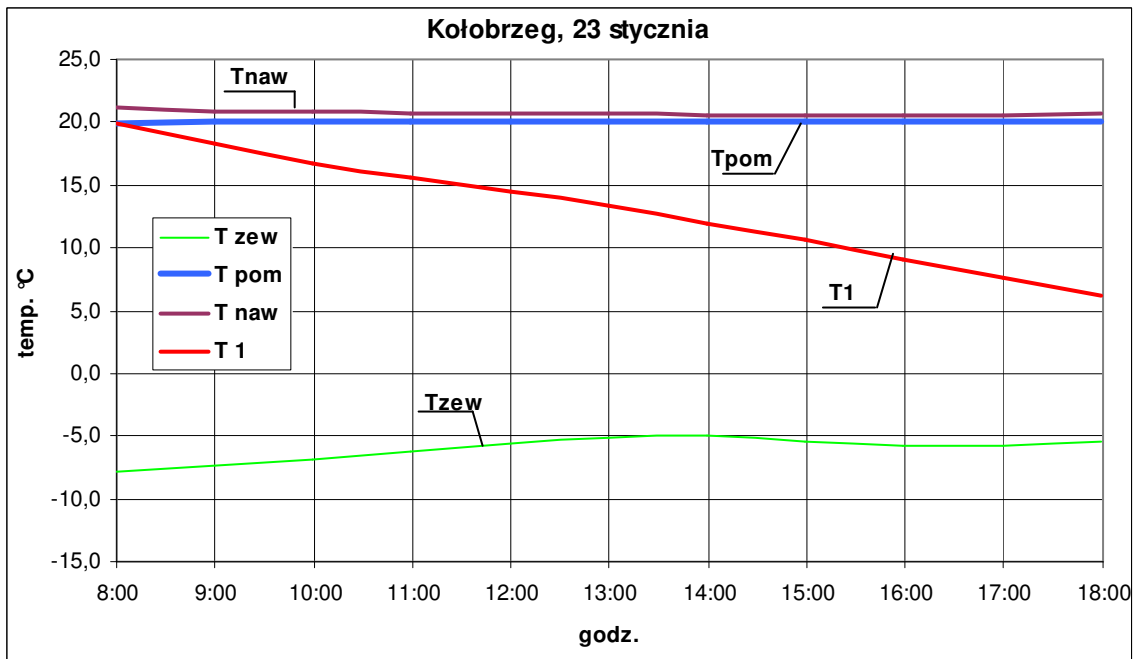
Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki symulacji temperatur powietrza: zewnętrznego (T_{zew}), w pomieszczeniu (T_{pom}), nawiewanego (T_{naw}), za wymiennikiem (T_1). Temperatura powietrza nawiewanego do pomieszczenia wyznaczona została na podstawie bilansu cieplnego pomieszczenia.



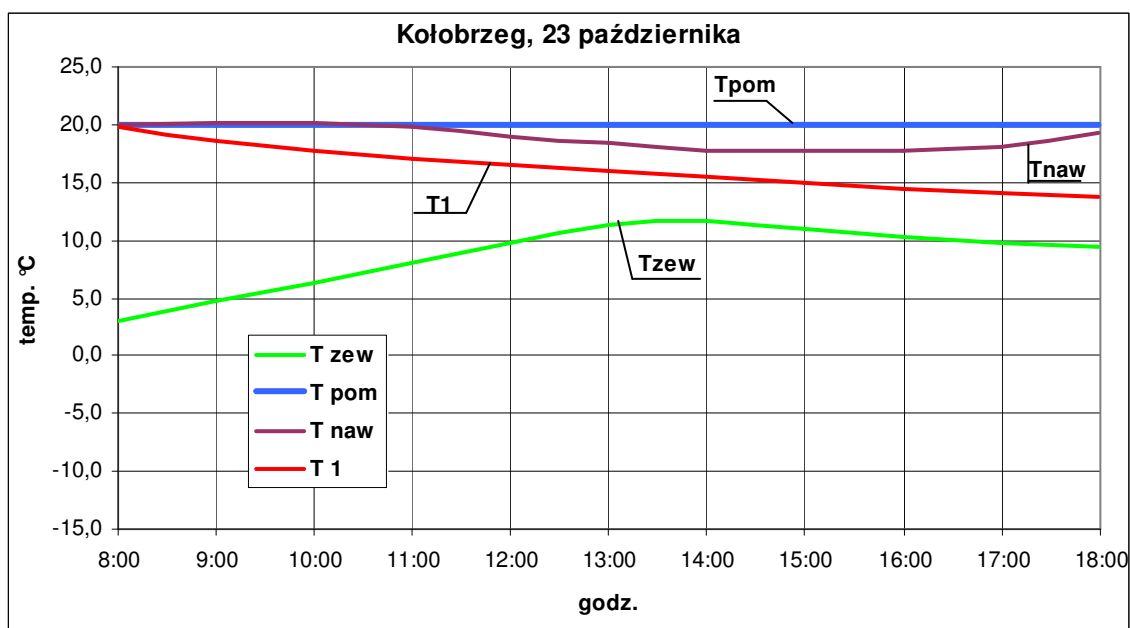
Rysunek 31. Przykładowy przebieg temperatur dla Poznania (16 lutego). Oznaczenia:
Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; *Tpom* – temperatura powietrza w pomieszczeniu;
Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; *T1* – temperatura powietrza za wymiennikiem



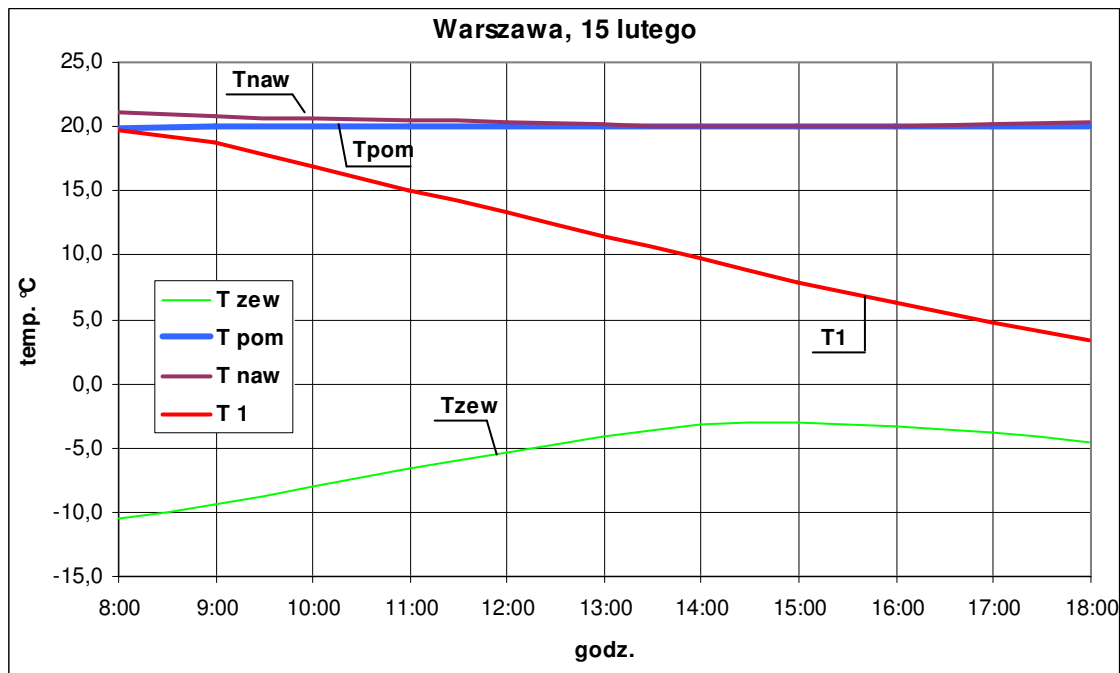
Rysunek 32. Przykładowy przebieg temperatur dla Poznania (21 grudnia). Oznaczenia:
Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; *Tpom* – temperatura powietrza w pomieszczeniu;
Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; *T1* – temperatura powietrza za wymiennikiem



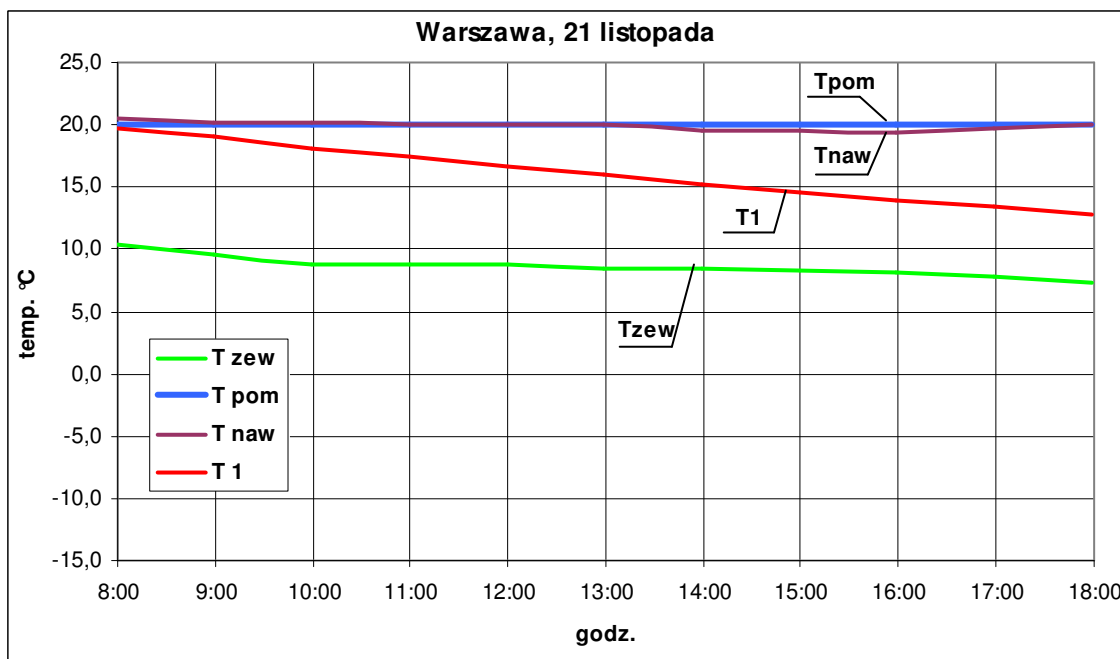
Rysunek 33. Przykładowy przebieg temperatur dla Kołobrzegu (23 stycznia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



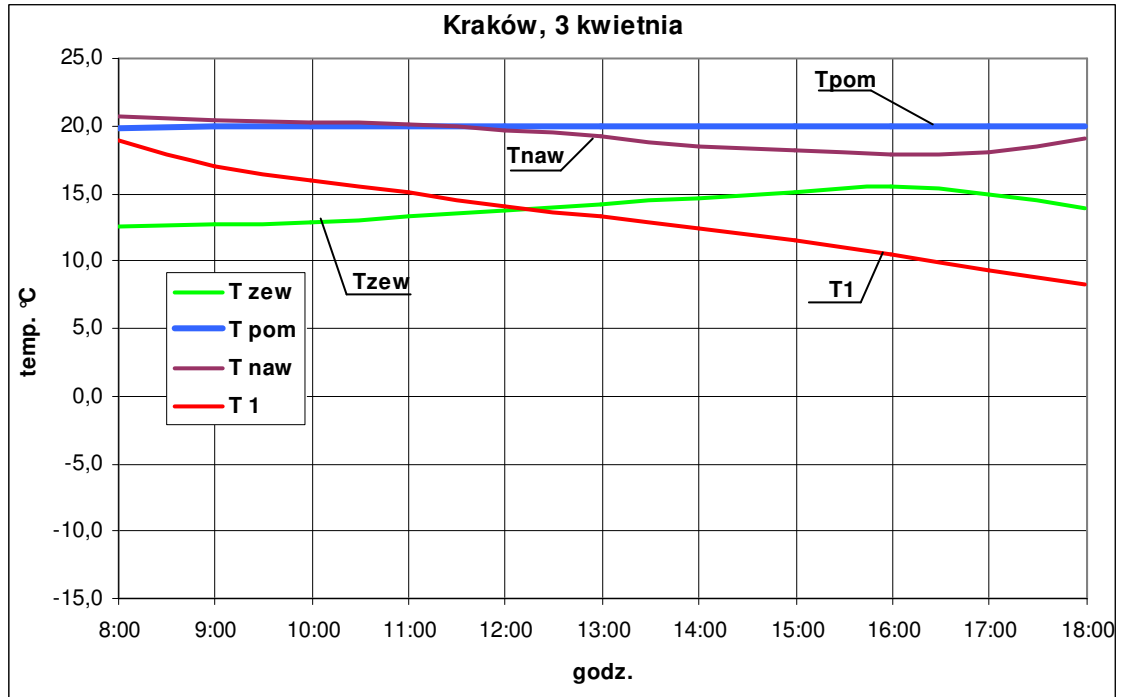
Rysunek 34. Przykładowy przebieg temperatur dla Kołobrzegu (23 października). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



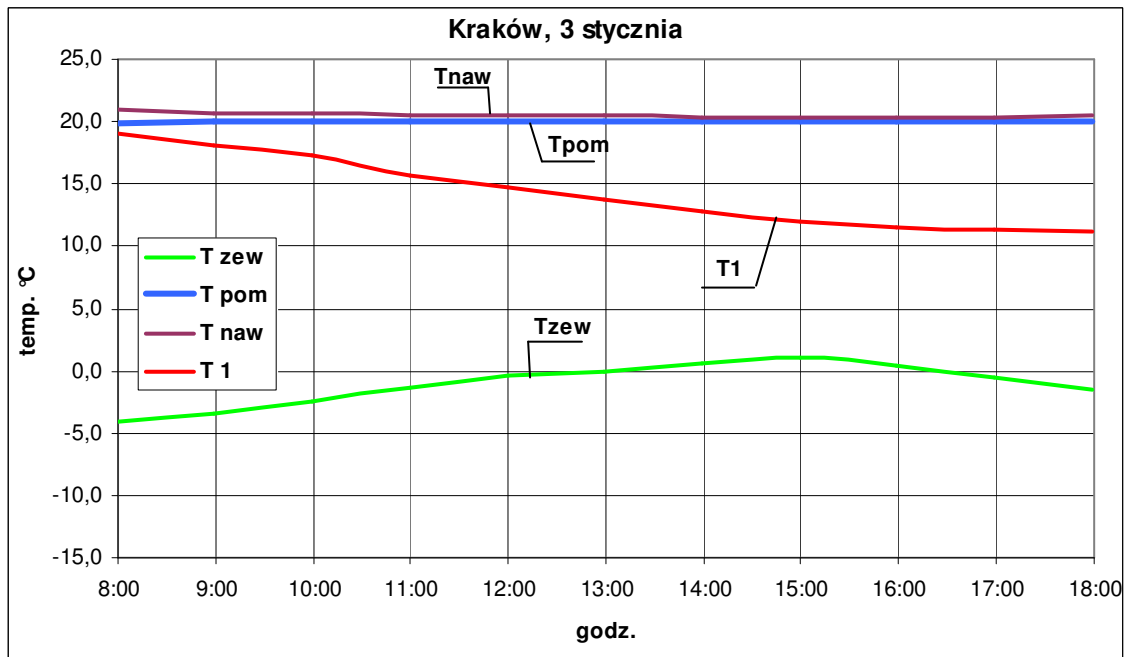
Rysunek 35. Przykładowy przebieg temperatur dla Warszawy (15 lutego). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



Rysunek 36. Przykładowy przebieg temperatur dla Warszawy (21 listopada). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

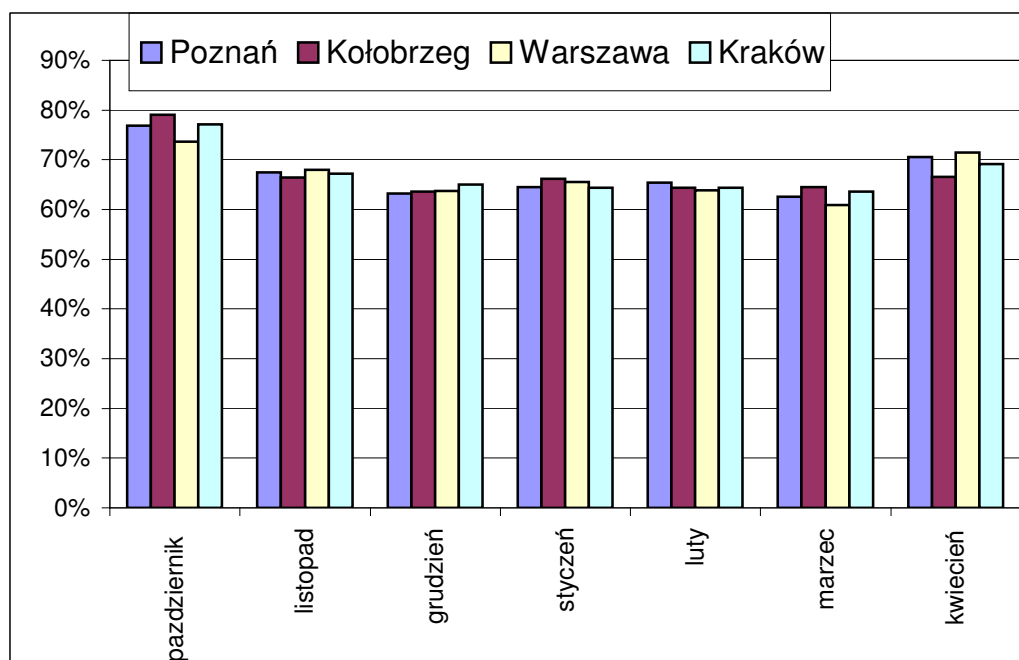


Rysunek 37. Przykładowy przebieg temperatur dla Krakowa (3 kwietnia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



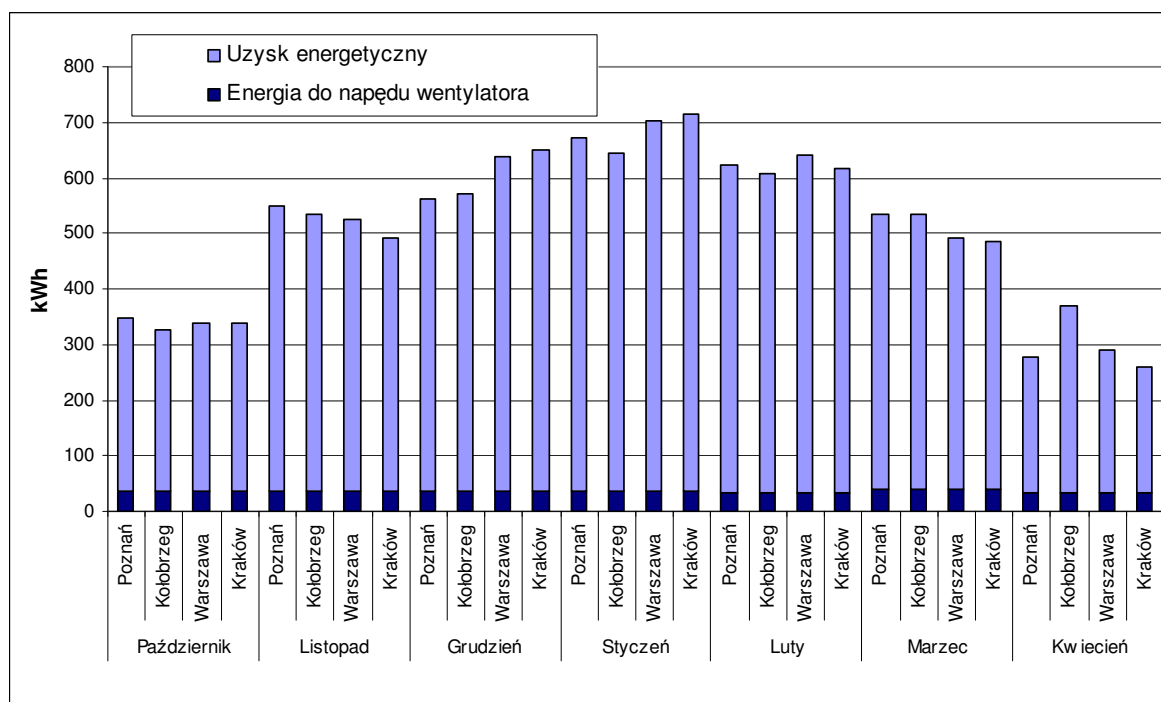
Rysunek 38. Przykładowy przebieg temperatur dla Krakowa (3 stycznia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

W oparciu o symulację pracy wymiennika w ciągu 7 miesięcy (październik – kwiecień) oraz na podstawie obliczeń obciążenia cieplnego pomieszczenia opisanego w punkcie 6.1 przeprowadzono analizę energetyczną. Na rysunku 39 przedstawiono wykres obrazujący procentowe pokrycie przez wymiennik gruntowy zapotrzebowania na ciepło do podgrzania powietrza wentylacyjnego dla analizowanego przypadku.



Rysunek 39. Procentowe pokrycie zapotrzebowania na ciepło do podgrzania powietrza wentylującego przez wymiennik gruntowy dla czterech miast Polski (Poznań, Kołobrzeg, Warszawa, Kraków)

Na rysunku 40 przedstawiono miesięczne uzyski energetyczne możliwe do osiągnięcia, a także nakłady energetyczne związane z przetłaczaniem powietrza przez wymiennik gruntowy.



Rysunek 40. Miesięczne uzyski energetyczne oraz nakłady energetyczne związane z przetłaczaniem powietrza przez wymienniki

Rysunek 40 wykazuje, że magazynowanie i pozyskiwanie energii cieplnej w regenerowanych wymiennikach gruntowych jest bardzo efektywne. Stosunek energii uzyskanej do energii doprowadzonej do układu (związanej z przetłaczaniem powietrza przez wymiennik gruntowy) jest bardzo wysoki.

6.2.1 Analiza finansowa układu wentylacji z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono schemat działania układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem dwu naprzemiennie pracujących wymienników. Szerszego opisu przedstawionego układu dokonują autorzy prac [8, 9, 10]. W pracy [10] M. Besler wykazuje opłacalność stosowania w/w rozwiązania. W pracy [38] Rdzak wykazuje opłacalność stosowania dwu naprzemiennie pracujących wymienników w układzie pośredniego ogrzewania płaszczyznowego. Dlatego w niniejszej pracy zostanie wykonana jedynie analiza opłacalności rozbudowy systemu uzdatniania powietrza przedstawionego na rysunkach 3 i 4. Rozbudowa polega na dodaniu do układu przepustnic oraz kanałów wentylacyjnych (rysunki 7 i 8). Opis takiego układu przedstawiono w rozdziale 3.1.

Założenia:

- nagrzewnica powietrza zasilana jest wodą z kotła gazowego,
- rozbudowa nie wymaga modyfikacji układu automatycznej regulacji.

Łącznie koszty inwestycyjne wynoszą: 2353 zł. Szczegółowe obliczenia kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych przedstawiono w załączniku nr 2. Do oceny opłacalności inwestycji posłużono się dwoma wskaźnikami: SPBT oraz NPV.

Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT.

Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT (Simply Pay Back Time), to czas, który musi upłynąć od momentu rozpoczęcia inwestycji do chwili odzyskania początkowych nakładów przez osiągnięcie w kolejnych latach nadwyżki finansowej [24].

SPBT jest najprostszym wskaźnikiem oceny w porównaniu z rozwiązaniem bazowym. Im krótszy jest okres zwrotu nakładów, tym inwestycja jest korzystniejsza. Na ogół jako opłacalne uznaje się inwestycje, których czas zwrotu nie przekracza 7 lat [27].

$$SPBT = \frac{1}{\text{stopa_zwrotu}}$$

$$\text{Stopa_zwrotu} = \frac{\text{zysk_netto}}{\text{naklad_inwestycyjny}}$$

W analizowanym przypadku nadwyżka finansowa wynika ze zmniejszonego zapotrzebowania ciepła do podgrzania powietrza wentylującego.

Tabela 9. Zestawienie oszczędności i wskaźnika SPBT dla analizowanego przypadku

Miasto	Oszczędności w stosunku do układu z dwoma naprzemiennie pracującymi wymiennikami (dla okresu październik – kwiecień):	Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT
	zł	lata
Poznań	434	5,4
Kołobrzeg	379	6,2
Warszawa	420	5,6
Kraków	383	6,1

Stwierdzić można więc, że inwestycja jest opłacalna.

Wartość zaktualizowana netto NPV.

Metoda wartości zaktualizowanej netto pozwala określić obecną wartość wpływów

i wydatków pieniężnych związanych z realizacją ocenianego przedsięwzięcia. Wartość bieżąca netto (NPV) jest wyrażana różnicą między wpływami w całym okresie funkcjonowania obiektu i nakładami [24, 27].

NPV określa się jako sumę zdyskontowanych oddzielnie dla każdego roku przepływów pieniężnych netto (NCF), zrealizowanych w całym okresie objętym rachunkiem, przy stałym poziomie stopy procentowej (dyskontowej). Wskaźnik NPV jest zalecany przez UNIDO i Bank Światowy.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+R)^t} - N, \text{ gdzie:}$$

NPV - wartość bieżąca netto,

CF_t – oczekiwany przepływ środków finansowych związanych z inwestycją (Cash flow) w roku [zł],

$CF_t = \pm O_{\text{rcot}}$ – roczna oszczędność kosztów energii w roku „t”,

n – liczba lat objęta analizą ekonomiczną,

R – stopa dyskontowa w okresie obliczeniowym, przyjęto $R=7\%$,

N – nakłady inwestycyjne [zł].

W tabelach 9-12 przedstawiono zaktualizowaną wartość netto NPV dla analizowanego systemu.

Tabela 10. Wartość zaktualizowana netto dla Poznania

rok	CF	$1/(1+R)^t$	CFT
	zł	-	zł
0	-1919	1,0000	-1919
1	434	0,9346	405
2	434	0,8734	379
3	434	0,8163	354
4	434	0,7629	331
5	434	0,7130	309
6	434	0,6663	289
7	434	0,6227	270
		NPV	417

Tabela 11. Wartość zaktualizowana netto dla Kołobrzegu

rok	CF	$1/(1+R)^t$	CFT
	zł	-	zł
0	-1974	1,0000	-1974
1	379	0,9346	354
2	379	0,8734	331
3	379	0,8163	309
4	379	0,7629	289
5	379	0,7130	270
6	379	0,6663	253
7	379	0,6227	236
		NPV	69

Tabela 12. Wartość zaktualizowana netto dla Warszawy

rok	CF	$1/(1+R)^t$	CFT
	zł	-	zł
0	-1933	1,0000	-1933
1	420	0,9346	393
2	420	0,8734	367
3	420	0,8163	343
4	420	0,7629	320
5	420	0,7130	299
6	420	0,6663	280
7	420	0,6227	262
		NPV	330

Tabela 13. Wartość zaktualizowana netto dla Krakowa

rok	CF	$1/(1+R)^t$	CFT
	zł	-	zł
0	-1970	1,0000	-1970
1	383	0,9346	358
2	383	0,8734	335
3	383	0,8163	313
4	383	0,7629	293
5	383	0,7130	273
6	383	0,6663	256
7	383	0,6227	239
		NPV	97

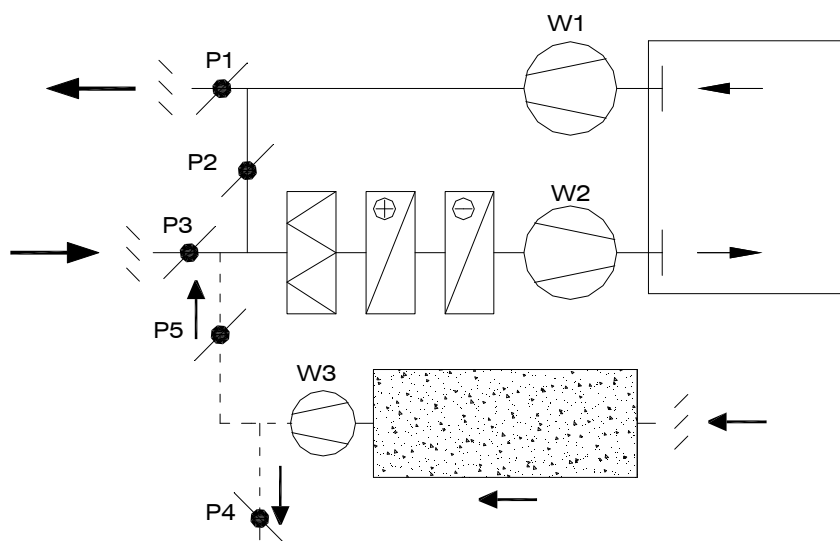
Inwestycja jest opłacalna wówczas, gdy wartość bieżąca netto obliczana dla danego okresu jest dodatnia. W analizowanym przypadku warunek opłacalności inwestycji jest spełniony.

6.3 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu

Schemat instalacji uzdatniania powietrza z magazynowaniem chłodu w izolowanym złożu żwirowym przedstawiono na rysunku 41.

Okres pracy izolowanego złoża żwirowego w systemie wentylacji lub klimatyzacji podzielono na dwa cykle. Cykl pracy nocnej, gdy następuje ochładzanie wypełnienia oraz cykl pracy dziennej podczas którego dochodzi do ochładzania powietrza zewnętrznego w złożu.

W nocy wentylator W3 przetłacza powietrze przez złożo, przepustnica P4 jest otwarta, P5 - zamknięta. W ciągu dnia w wyniku działania układu automatycznej regulacji, w miarę potrzeb, wykorzystywany jest chłód zmagazynowany w godzinach nocnych w izolowanym złożu żwirowym.



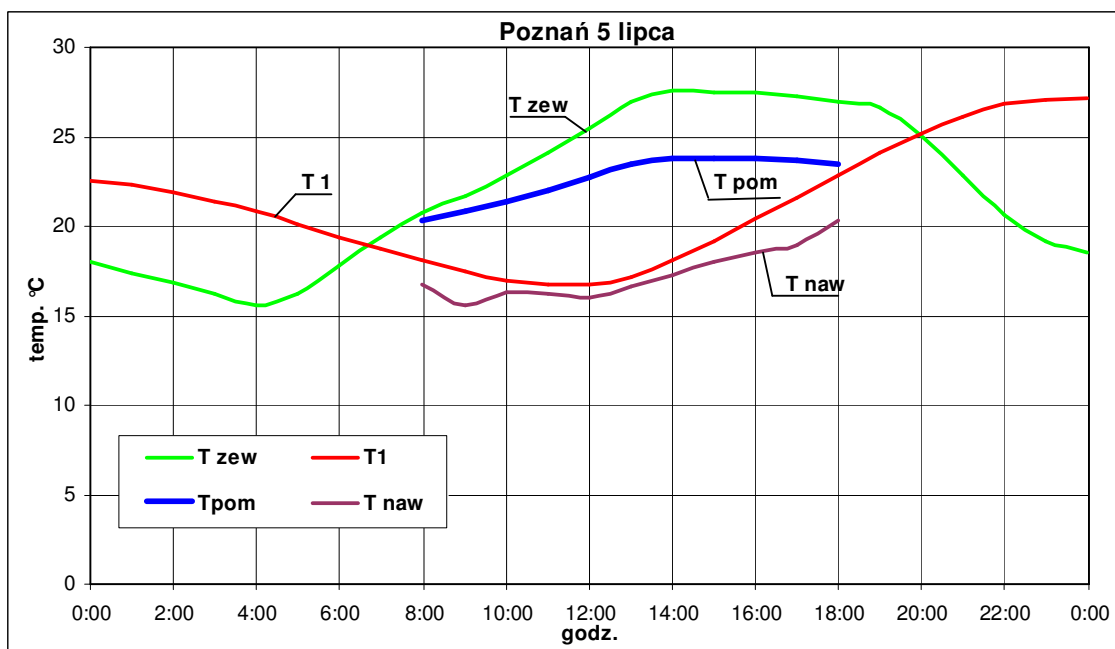
Rysunek 41. Przykład układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu

Założenia przyjęte do analizy:

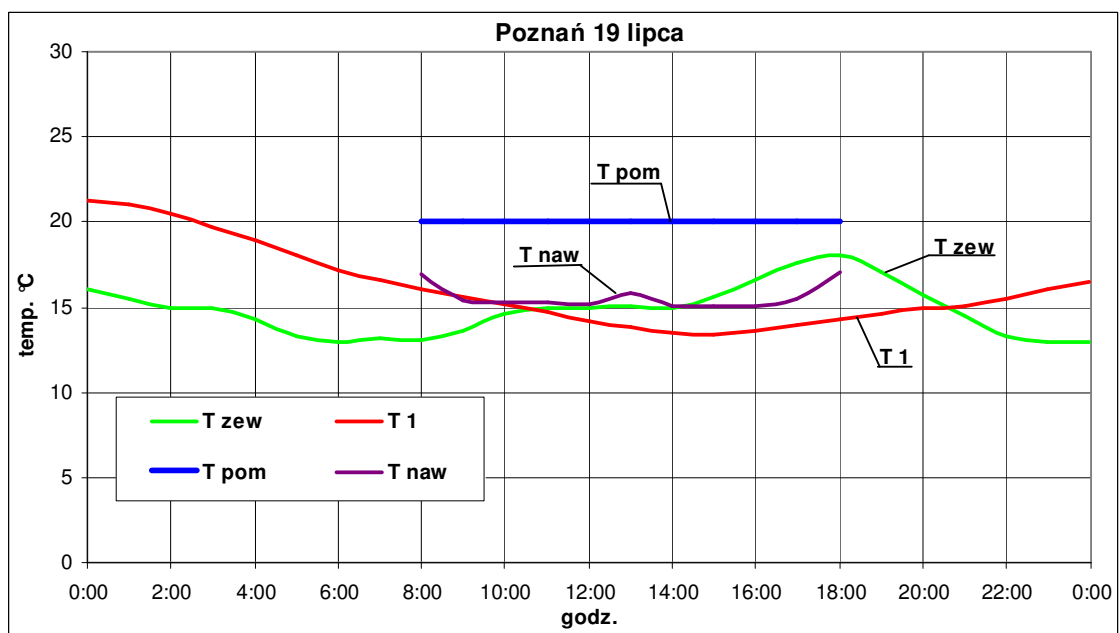
- Założenia do obliczeń obciążenia cieplnego pomieszczenia opisano w rozdziale 6.1,
- Maksymalne zyski ciepła, przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz przyjęty strumień powietrza wentylującego zestawiono w tabeli nr 8,
- Układ wentylacji pracuje w godzinach 8–18,

- W godzinach 18–8 układ wentylacyjny utrzymuje 1-krotną wymianę powietrza w pomieszczeniu,
- Instalacja wentylacyjna wyposażona jest w układ automatycznej regulacji,
- Chłodnica zasilana jest z urządzenia chłodniczego WSAT-EE 21 CLIVET o mocy 3 kW,
- Obliczenia wykonano dla okresu maj – wrzesień.

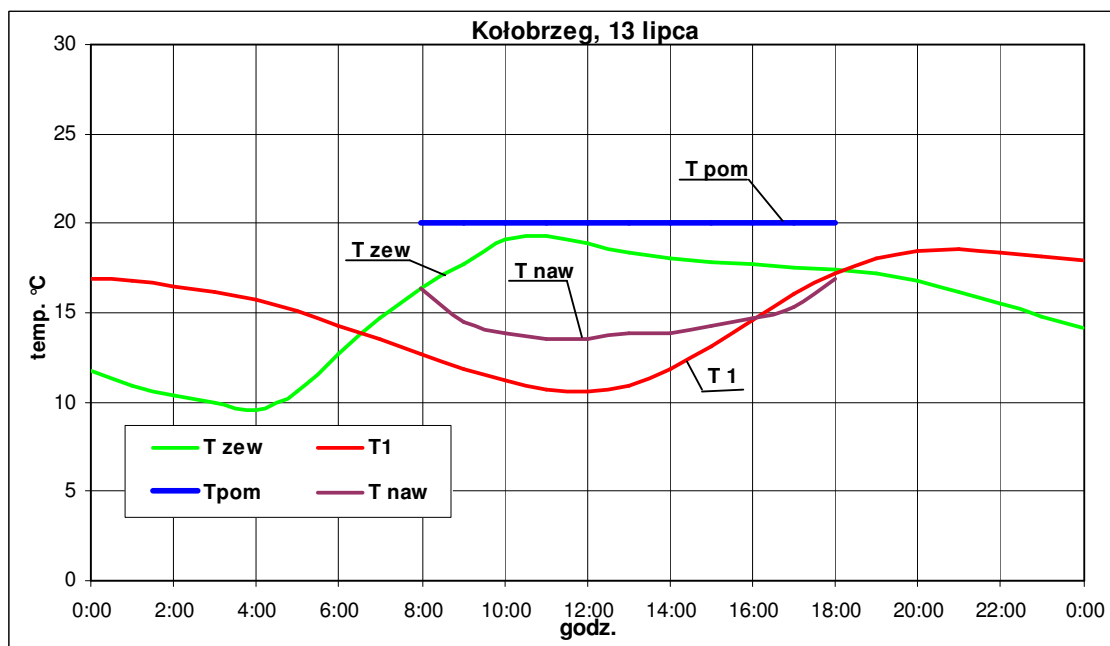
Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki symulacji temperatur powietrza: zewnętrznego (**T_{zew}**), w pomieszczeniu (**T_{pom}**), nawiewanego (**T_{naw}**), za wymiennikiem (**T_I**). Temperatura powietrza nawiewanego do pomieszczenia wyznaczona została na podstawie bilansu cieplnego pomieszczenia.



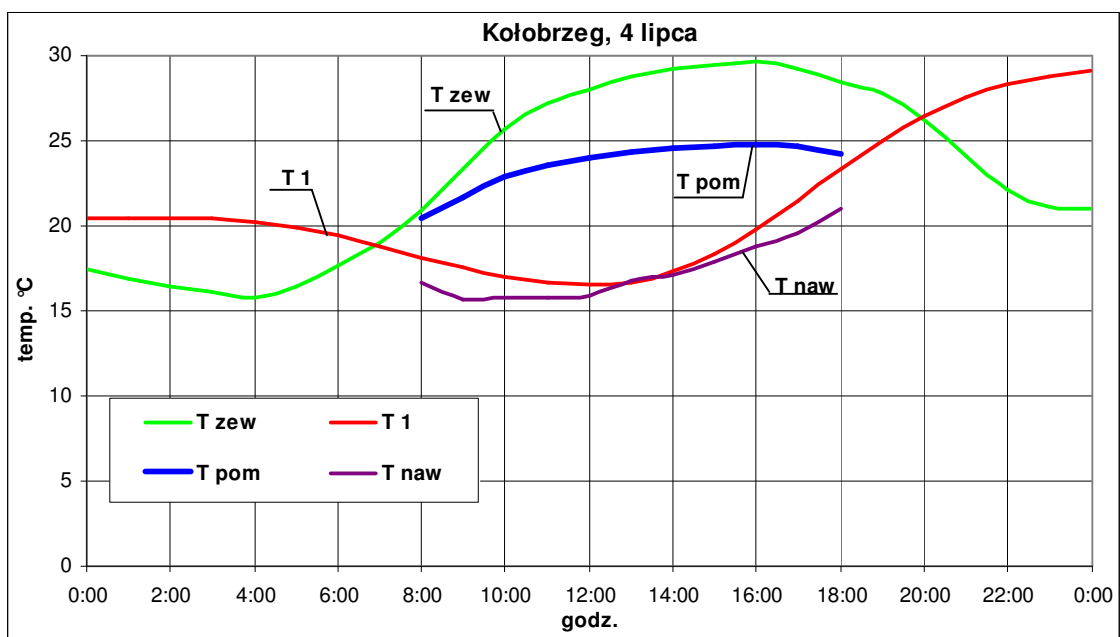
Rysunek 42. Przykładowy przebieg temperatur dla Poznania (5 lipca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



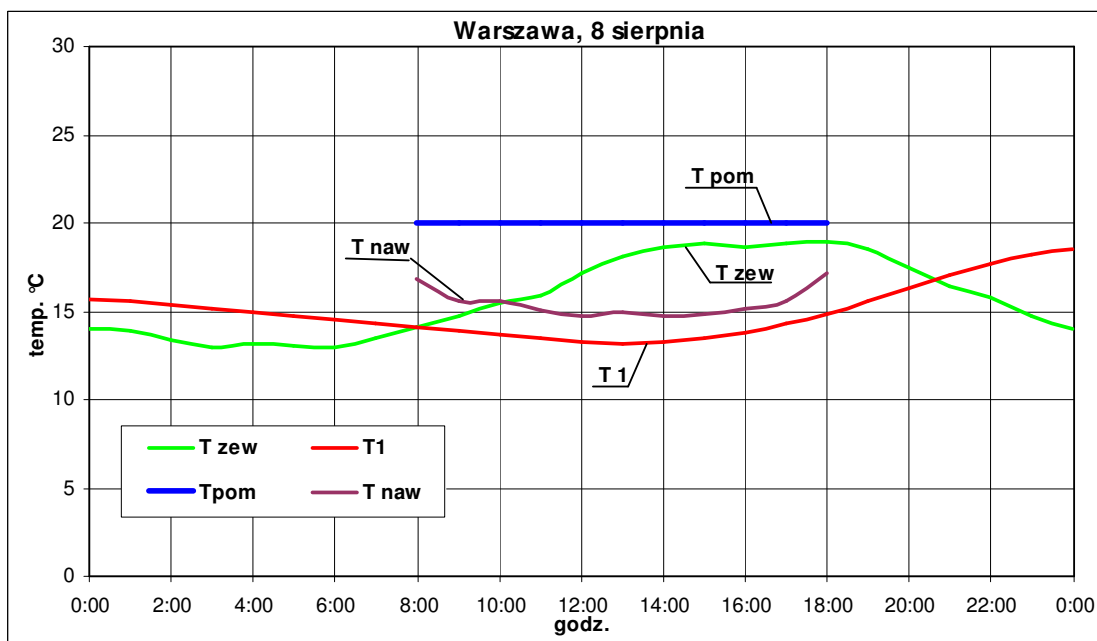
Rysunek 43. Przykładowy przebieg temperatur dla Poznania (19 lipca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



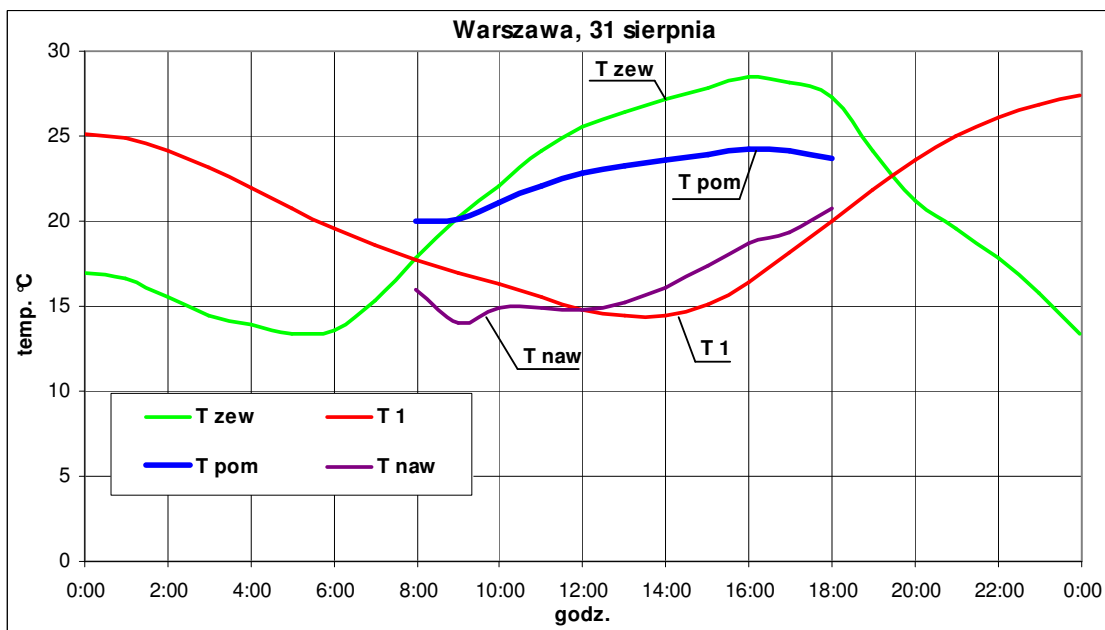
Rysunek 44. Przykładowy przebieg temperatur dla Kołobrzegu (13 lipca). Oznaczenia: T_{zew} – temperatura powietrza zewnętrznego; T_{pom} – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T_{naw} – temperatura powietrza nawiewanego; T₁ – temperatura powietrza za wymiennikiem



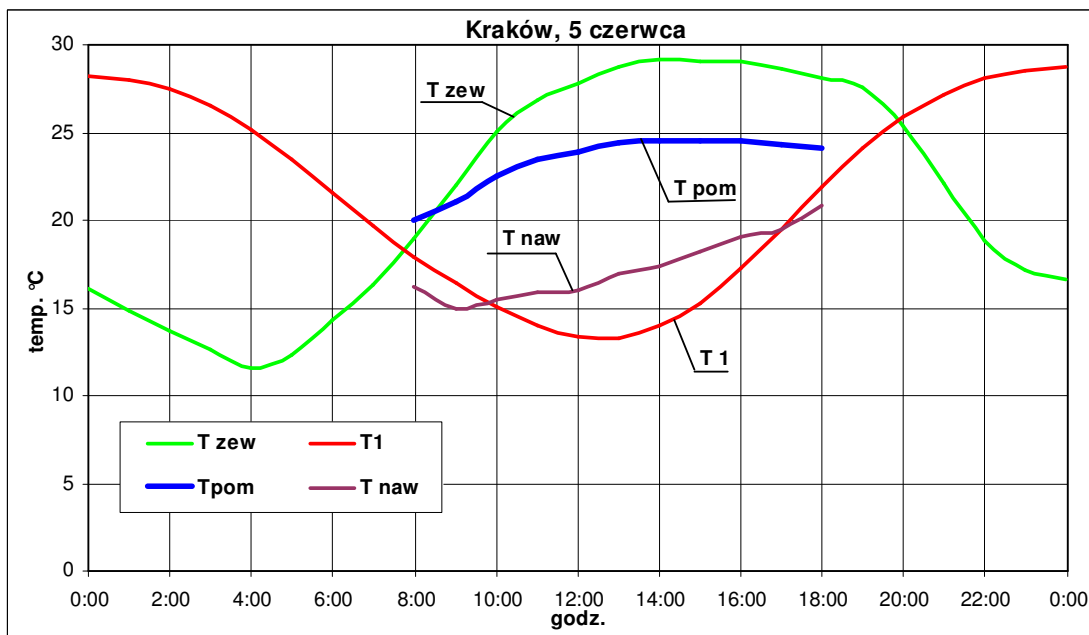
Rysunek 45. Przykładowy przebieg temperatur dla Kołobrzegu (4 lipca). Oznaczenia: T_{zew} – temperatura powietrza zewnętrznego; T_{pom} – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T_{naw} – temperatura powietrza nawiewanego; T₁ – temperatura powietrza za wymiennikiem



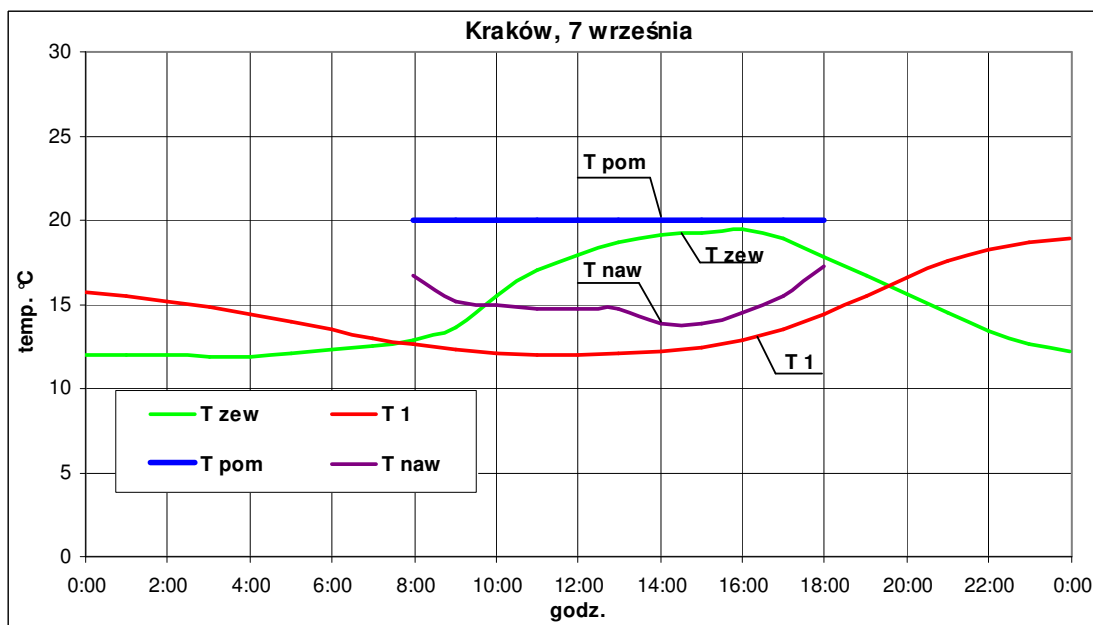
Rysunek 46. Przykładowy przebieg temperatur dla Warszawy (8 sierpnia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



Rysunek 47. Przykładowy przebieg temperatur dla Warszawy (13 sierpnia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; Tnaw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



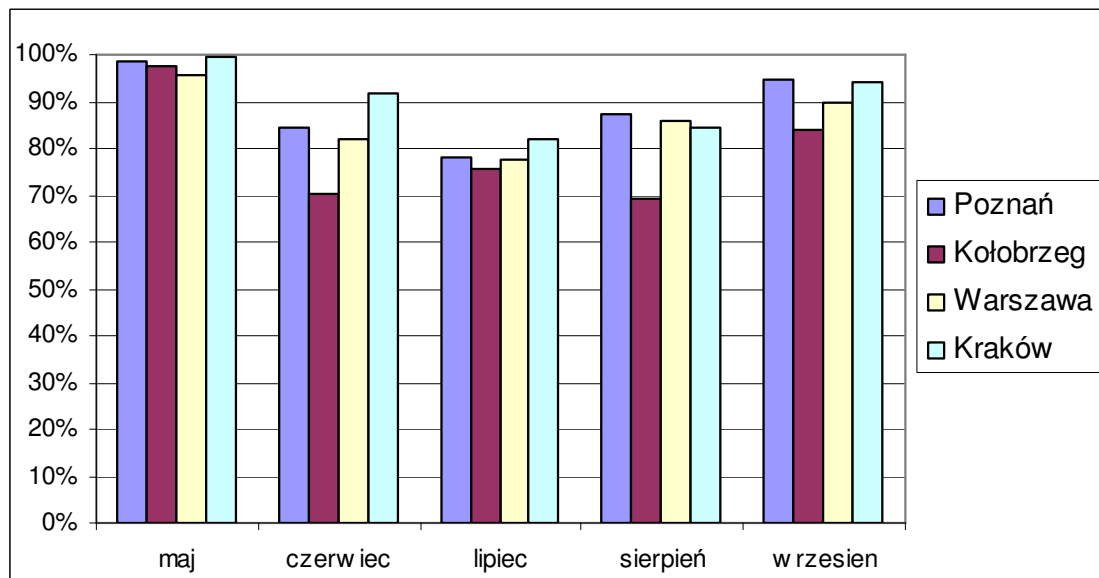
Rysunek 48. Przykładowy przebieg temperatur dla Krakowa (5 czerwca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T naw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



Rysunek 49. Przykładowy przebieg temperatur dla Krakowa (7 września). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T naw – temperatura powietrza nawiewanego; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

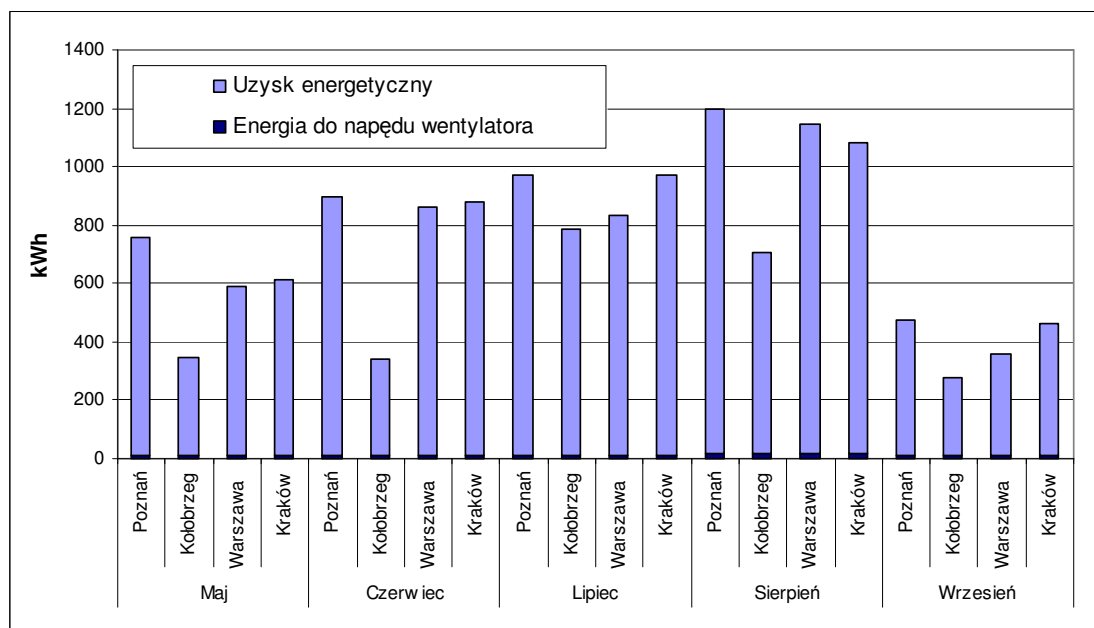
W oparciu o symulację pracy wymiennika w ciągu 5 miesięcy (maj – wrzesień) oraz obliczenia obciążenia cieplnego analizowanego pomieszczenia przeprowadzono analizę energetyczną układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego.

Na rysunku 50 przedstawiono wykres obrazujący procentowe pokrycie przez analizowany układ zapotrzebowania na energię do chłodzenia powietrza wentylującego.



Rysunek 50. Procentowe pokrycie przez złożo żwirowe zapotrzebowania na energię do chłodzenia powietrza wentylującego dla 4 miast Polski (Poznań, Kołobrzeg, Warszawa, Kraków)

Na rysunku 51 przedstawiono miesięczne uzyski energetyczne, a także nakłady energetyczne związane z przetłaczaniem powietrza przez izolowane złożo żwirowe.



Rysunek 51. Miesięczne uzyski energetyczne oraz nakłady energetyczne związane z przetłaczaniem powietrza przez złożo żwirowe

Rysunek 51 wykazuje, że zastosowanie izolowanego złoźa zwirowego do magazynowania chłodu jest bardzo efektywne. Stosunek energii uzyskanej do energii doprowadzonej do układu (związanej z przetłaczaniem powietrza przez wymiennik gruntowy) jest wysoki.

6.3.1 Analiza finansowa układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoźa zwirowego do magazynowania chłodu

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono schemat działania układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem izolowanego złoźa zwirowego. Nakłady inwestycyjne dla analizowanego przypadku, związane z budową zasobnika zwirowego oraz z instalacją włączającą zasobnik do układu wentylacji, wynoszą 5310 zł. Szczegółowe obliczenia kosztów inwestycyjnych zamieszczono w załączniku nr 2.

Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT.

W analizowanym rozwiązaniu oszczędności wynikają ze zmniejszonego zużycia energii elektrycznej urządzenie chłodnicze.

W tabeli 14 przedstawiono roczne oszczędności eksploatacyjne oraz prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych.

Tabela 14. Zestawienie oszczędności i wskaźnika SPBT dla analizowanego przypadku

Miasto	Oszczędności w stosunku do układu wentylacji bez izolowanego złoźa zwirowego (dla okresu maj – wrzesień):	Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT
	zł	lata
Poznań	84	63
Kołobrzeg	53	99
Warszawa	75	70
Kraków	80	65

Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych wyniósł więcej niż 7 lat. Zatem taka inwestycja nie jest opłacalna, co doświadczony projektant mógłby ocenić a priori.

Jednakże jeżeli w instalacji wentylacyjnej uwzględniono izolowane złoźe zwirowe, wówczas można znacznie zmniejszyć wielkość i koszt urządzenia chłodniczego. Zastosowanie złoźa zwirowego zmniejsza zapotrzebowanie chłodu o około 85%.

Poniżej przeanalizowano inny przypadek.

Przykładowo: dla instalacji klimatyzacyjnej wyposażonej w urządzenie chłodnicze WSAT-EE 102 CLIVET o mocy chłodniczej 27 kW, koszt urządzenia chłodniczego

wynosi około 35 400 zł (9130 euro) netto.

Jeżeli zastosowano złożę żwirowe o wymiarach 2m x 7,5m, L=3,8m oraz urządzenie chłodnicze WSAT-EE 21 CLIVET o mocy 3 kW, wówczas koszty układu chłodniczego będą wyglądały następująco:

- koszt złoża wraz z instalacją oraz wentylatorem – około 17 000 zł netto.
- urządzenie chłodnicze WSAT-EE 21 CLIVET – około 12 600 zł (3 250 euro) netto.

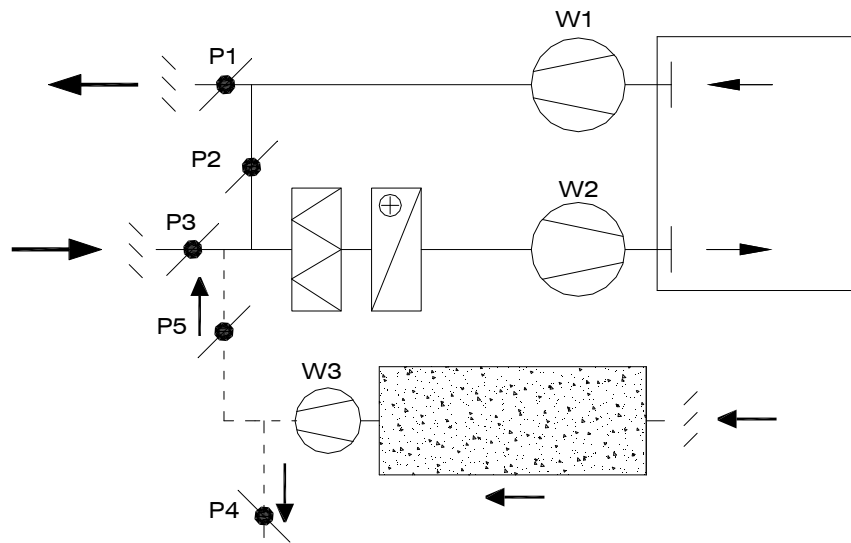
Założono, że izolowane złożę żwirowe pokrywa również około 85% zapotrzebowania chłodu.

Całkowite koszty układu wytwarzania chłodu wyniosą około 29 600 zł netto. W porównaniu do konwencjonalnego układu z urządzeniem chłodniczym o mocy całkowitej 27 kW daje to 5 800 zł oszczędności, co stanowi 16% oszczędności w kosztach inwestycyjnych. Dodatkowo, jak wykazano wcześniej, układ z zasobnikiem żwirowym obniża koszt wytwarzania energii chłodniczej o około 80%.

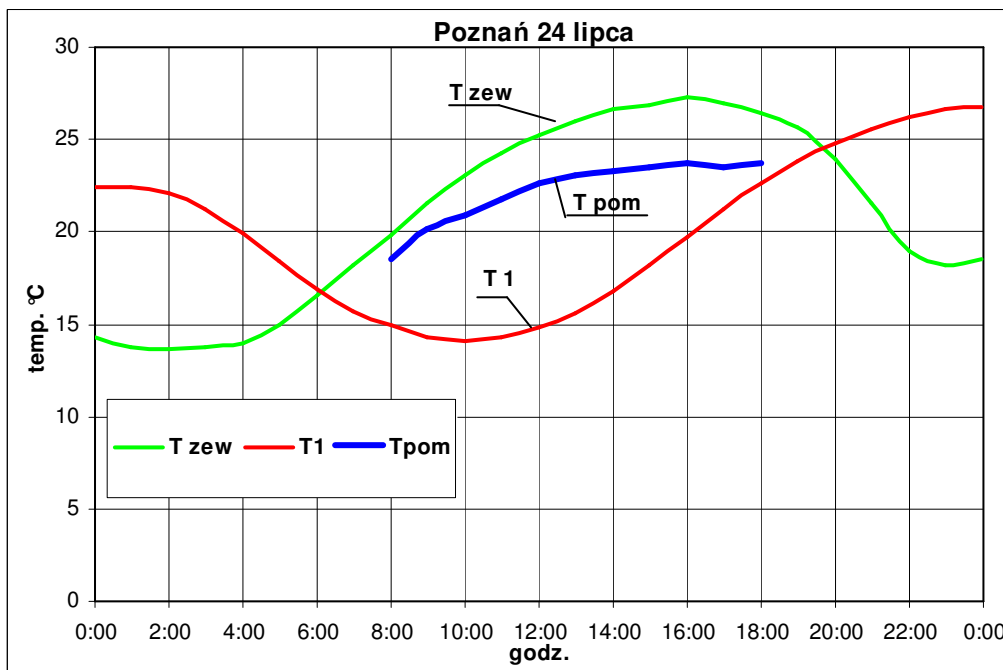
6.4 Analiza energetyczna układu wentylacji z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego bez konwencjonalnego układu chłodzenia

W okresie ciepłym wykorzystanie niskich temperatur panujących w nocy oraz akumulowanie energii chłodniczej w zasobniku żwirowym pozwalana na pokrycie średnio około 85% zapotrzebowania na chłód.

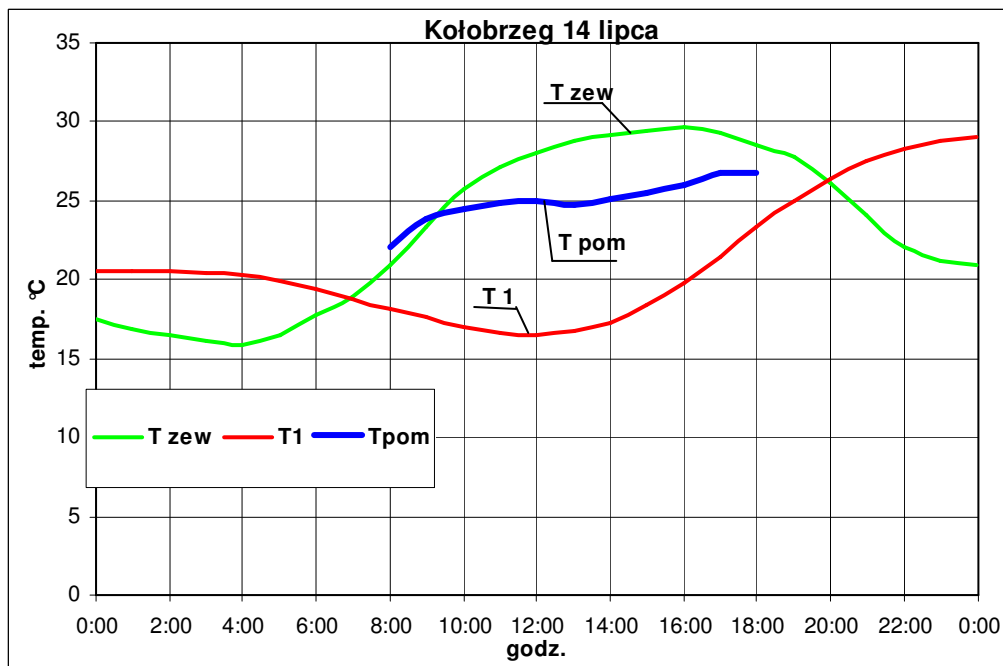
Przeanalizowano pracę układu wentylacji z zastosowaniem akumulatora żwirowego do magazynowania chłodu bez konwencjonalnego układu chłodzenia. Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 52. Natomiast przykładowe przebiegi temperatur w dniach, w których temperatura w pomieszczeniu przekroczyła założone 25 °C przedstawiono na rysunkach 53 – 56. Układ automatycznej regulacji sterując pracą przepustnic wykorzystuje w miarę potrzeb chłód zmagazynowany w złożu żwirowym.



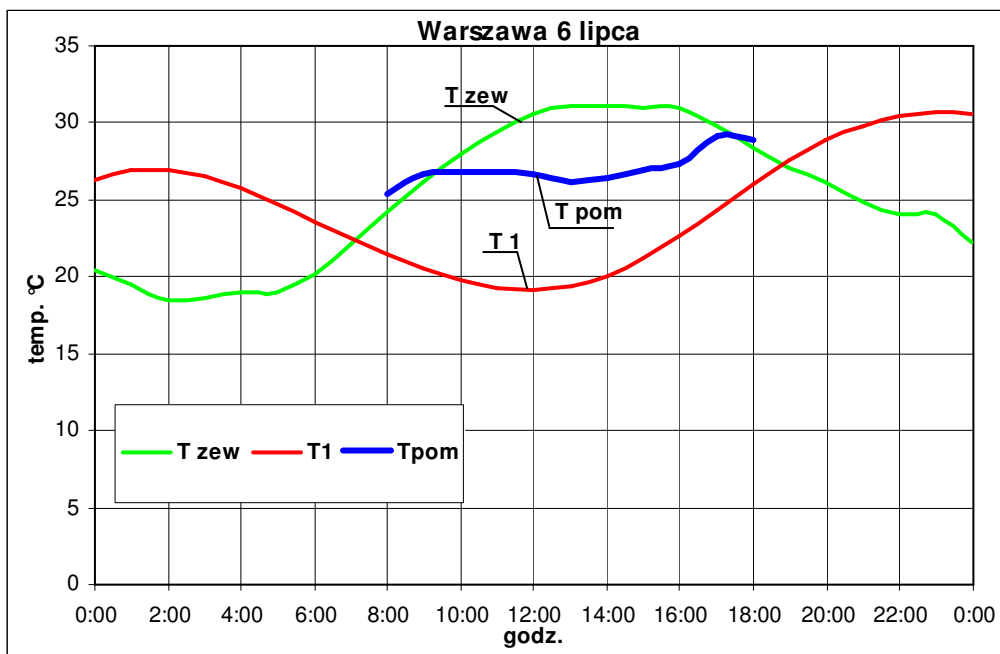
Rysunek 52. Schemat układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem akumulatora żwirowego do magazynowania chłodu bez konwencjonalnego układu chłodzenia



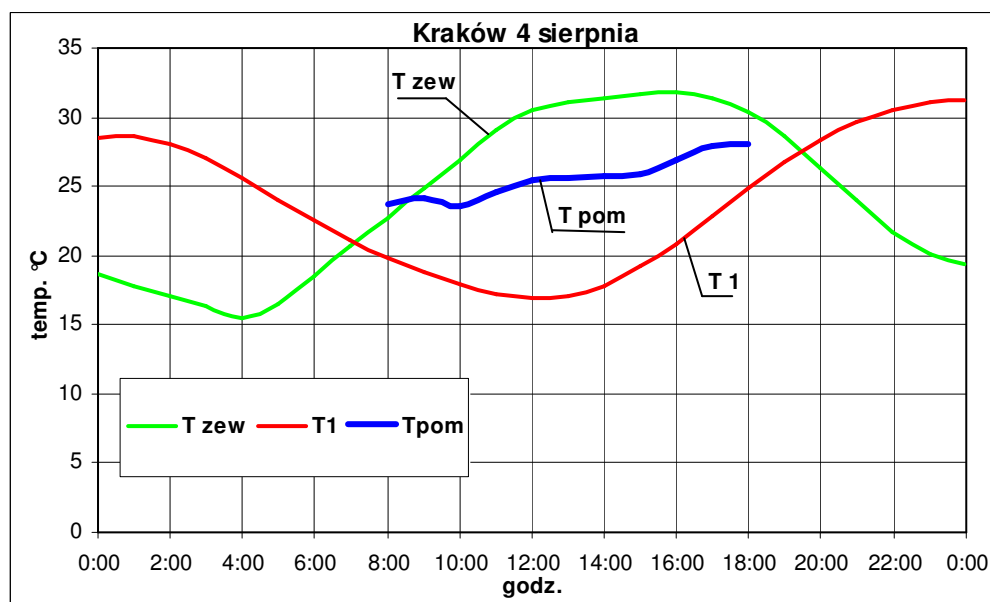
Rysunek 53. Przykładowy przebieg temperatur dla Poznania(24 lipca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem



Rysunek 54. Przykładowy przebieg temperatur dla Kolobrzegu (14 lipca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

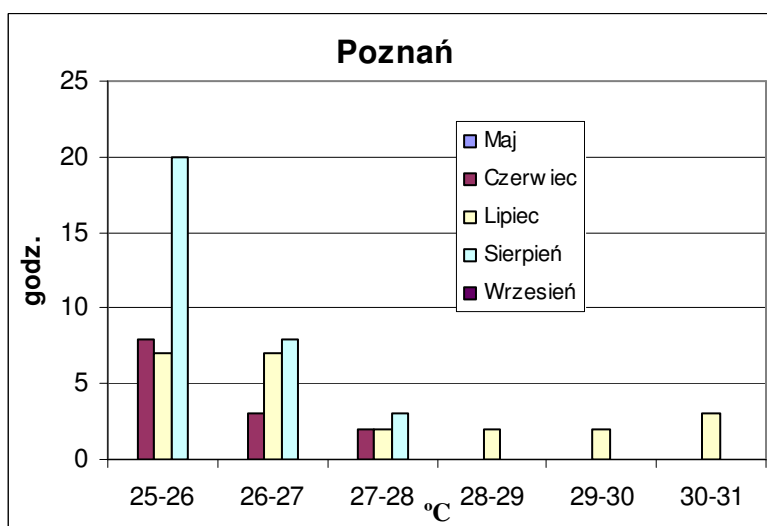


Rysunek 55. Przykładowy przebieg temperatur dla Warszawy (6 lipca). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

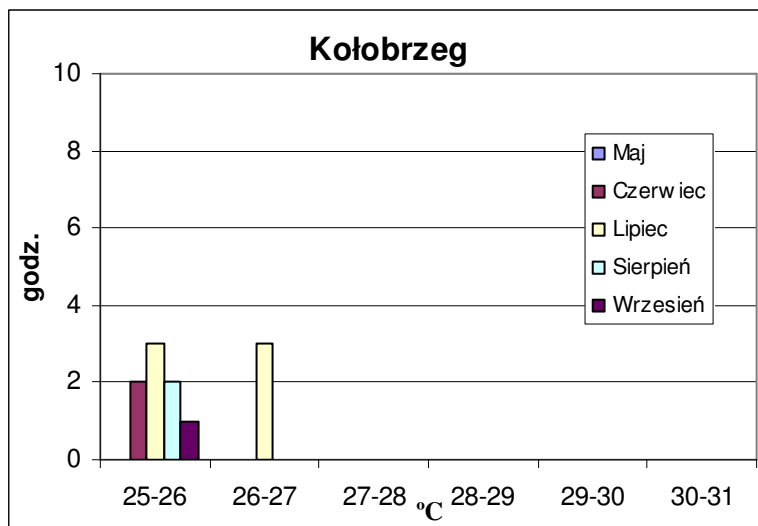


Rysunek 56. Przykładowy przebieg temperatur dla Krakowa (4 sierpnia). Oznaczenia: Tzew – temperatura powietrza zewnętrznego; Tpom – temperatura powietrza w pomieszczeniu; T1 – temperatura powietrza za wymiennikiem

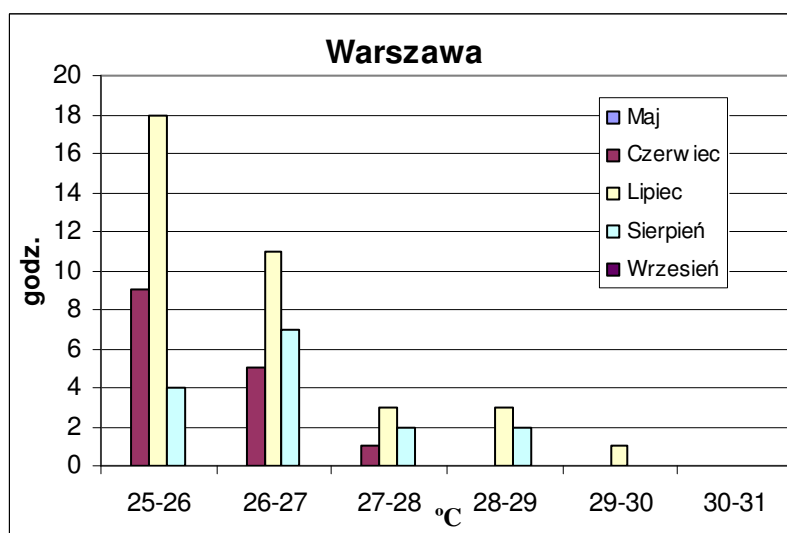
Zastosowanie akumulatora żwirowego jako jedyne źródła chłodu powoduje czasem niedotrzymanie warunków temperaturowych w pomieszczeniu. Na rysunkach 57-60 przedstawiono wykresy obrazujące liczbę godzin występowania temperatur w pomieszczeniu wyższych od temperatury założonej 25 °C. Należy zauważyć, że temperatura w pomieszczeniu przekracza założone 25 °C często przy temperaturach zewnętrznych przekraczających 30 °C.



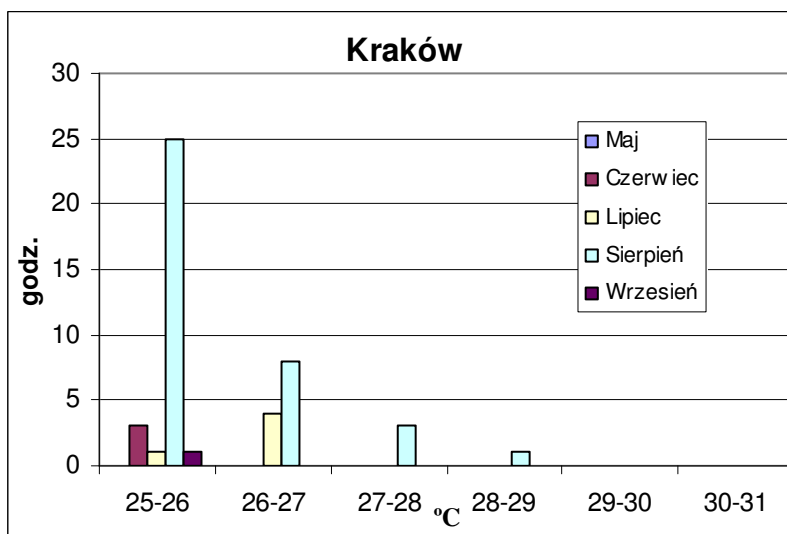
Rysunek 57. Liczba godzin występowania w pomieszczeniu temperatur z podanego na osi x zakresu



Rysunek 58. Liczba godzin występowania w pomieszczeniu temperatur z podanego na osi x zakresu



Rysunek 59. Liczba godzin występowania w pomieszczeniu temperatur z podanego na osi x zakresu



Rysunek 60. Liczba godzin występowania w pomieszczeniu temperatur z podanego na osi x zakresu

7 Analiza błędów i niepewności pomiarów

W badaniach wykorzystano następującą aparaturę pomiarową:

- w badaniach regeneracji wymiennika gruntowego:
 - strumień powietrza mierzono kryzą pomiarową podłączoną do u-rurki wypełnionej alkoholem etylowym o gęstości 789 kg/m^3 (20°C),
 - temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury podłączonymi do stacji meteorologicznej, dokładność pomiaru - 0,2 K,
 - wilgotność powietrza – higrografami o dokładności pomiaru – 10%,
 - spadek ciśnienia powietrza mierzono manometrem elektronicznym Kimo MP100.

- w badaniach magazynowania chłodu w złożu żwirowym nr 1 o wymiarach $1 \times 1 \times 4 \text{ m}$ – aparatura pomiarowa podłączona była do systemu BMS :
 - strumień powietrza mierzono kryzą pomiarową podłączoną do układu automatycznej regulacji poprzez przetwornik ciśnienia, dokładność pomiaru – 3Pa,
 - temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury o dokładność pomiaru 0,1 K,
 - wilgotność powietrza – czujnikiem wilgotności względnej powietrza, dokładność pomiaru – 5%,
 - spadek ciśnienia powietrza mierzono manometrem elektronicznym Kimo MP100.

- w badaniach magazynowania chłodu w złożu żwirowym nr 2 o wymiarach $0,36 \times 0,6 \times 1,92 \text{ m}$ – aparatura pomiarowa podłączona była do systemu BMS :
 - strumień powietrza kryzą pomiarową podłączoną do u-rurki wypełnionej alkoholem etylowym o gęstości 789 kg/m^3 (20°C),
 - temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury o dokładności pomiaru 0,1 K,
 - spadek ciśnienia powietrza mierzono manometrem elektronicznym Kimo MP100.

W celu wyznaczenia niepewności dotyczącej obliczania strumienia powietrza przepływającego przez kryzę oraz temperatury powietrza za wymiennikiem posłużono się złożoną niepewnością standardową oceny wielkości „y” u_y [25, 37].

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\bar{s}_i)^2}, \quad (7.1)$$

gdzie:

$\frac{\partial g}{\partial x_i}$ - pochodne cząstkowe funkcji g względem poszczególnych zmiennych x_i ,

n - liczba zmiennych,

\bar{s}_i - niepewności średnie cząstkowe.

Strumień powietrza wyznaczono z zależności [35]:

$$V = \frac{[(1 - \beta)^4]^{-1.5} \cdot (2 \cdot \rho_{cm} \cdot g \cdot h \cdot n \cdot \rho_p)^{\frac{1}{2}} \cdot c \cdot \varepsilon \cdot (\pi \cdot d^2)}{4 \cdot \rho_p}, \quad (7.2)$$

gdzie:

β , c , ε - stałe, charakterystyczne dla kryzy,

ρ_{cm} - gęstość cieczy manometrycznej,

ρ_p - gęstość powietrza w przestrzeni międzystropowej,

g - przyspieszenie ziemskie,

h - wychylenie mikromanometru,

n - przełożenie mikromanometru,

d - średnica kryzy.

Temperatury powietrza za wymiennikami wyznaczano z algorytmów rozwiązania modeli matematycznych wymienników. W tabeli 15 zestawiono wartości niepewności dla wyznaczania strumienia powietrza przepływającego przez kryzę oraz temperatury powietrza opuszczającego wymiennik.

Tabela 15. Zestawienie wartości niepewności dla wyznaczanych wielkości

Lp.	Wielkość fizyczna	Przyrząd pomiarowy /równania	Niepewność wyznaczenia	Średnia wartość wielkości mierzonej
1	Strumień powietrza – wymiennik gruntowy	Kryza, mikromanometr cieczowy.	$\pm 13,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (5,4%)	247 m^3/h 212 m^3/h
2	Strumień powietrza – izolowane złożo żwirowe nr 1	Kryza, mikromanometr cieczowy.	$\pm 24,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (9,6%)	252 m^3/h
3	Strumień powietrza – izolowane złożo żwirowe nr 1	Kryza, mikromanometr cieczowy.	$\pm 4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (6,4%)	78 m^3/h
4	Temperatura powietrza za wymiennikiem	Dwufazowy model wymiany ciepła i masy w wymienniku gruntowym	0,5 °C	-
5	Temperatura powietrza za wymiennikiem	Model wymiany ciepła w izolowanym złożu żwirowym	0,2 °C	-
6	Spadek ciśnienia przy przepływie powietrza przez złożo	Manometr elektroniczny Kimo MP100	1Pa	-

8 Podsumowanie

W pracy przedstawiono dwa nowe rozwiązania zwiększające efektywność pozyskiwania i magazynowania energii cieplnej (również chłodu) dla wentylacji i klimatyzacji z zastosowaniem złóż żwirowych. Pozwoli to ograniczyć zużycie energii pierwotnej dla potrzeb kształtowania mikroklimatu.

Rozwiązanie 1.

Przeprowadzono badania nowego rozwiązania, z regeneracją wymiennika gruntowego powietrzem usuwanym z pomieszczenia. Zweryfikowano model matematyczny wymiany ciepła i masy opracowany przez Kowalczyka [26]. Stwierdzono, że model ten może posłużyć do symulacji pracy wymiennika gruntowego podlegającego regeneracji.

Na podstawie obliczeń obciążenia cieplnego przykładowego pomieszczenia oraz na podstawie wyników symulacji pracy urządzenia wentylacyjnego z regeneracją wymienników gruntowych przeprowadzono analizę energetyczną proponowanego rozwiązania. Obliczenia wykonano, wykorzystując dane klimatyczne roku reprezentatywnego czterech miast Polski (Poznań, Warszawy, Kołobrzegu i Krakowa). Wyniki obliczeń wskazują, że zastosowanie dwóch naprzemiennie pracujących wymienników gruntowych, podlegających regeneracji, pozwala na pokrycie do 60% ciepła niezbędnego do podgrzania powietrza wentylującego w sezonie zimnym. Uzysk energetyczny jest dwukrotnie większy, niż w dotychczasowym rozwiązaniu (opisanym szerzej w rozdziale 1.1.1 i pracy [10]). Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych w stosunku do rozwiązania przedstawionego w rozdziale 1.1.1 nie przekracza 7 lat.

Rozwiązanie 2.

Przedstawiono i przeanalizowano efektywność układu uzdatniania powietrza z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego do magazynowania chłodu pozyskanego z powietrza zewnętrznego w godzinach nocnych. Badania takiego rozwiązania przeprowadzono na dwóch stanowiskach.

Opracowano również nowy, uproszczony model wymiany ciepła w izolowanym złożu żwirowym. Porównania wyników symulacji z wynikami badań wykazują, że nowy model dobrze odzwierciedla pracę izolowanego złoża żwirowego. Model ten może posłużyć do dalszych analiz pracy złóż żwirowych w różnych systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych.

Na podstawie obliczeń obciążenia cieplnego dla przykładowego pomieszczenia oraz na podstawie wyników symulacji pracy urządzenia wentylacyjnego z zastosowaniem izolowanego złoża żwirowego, przeprowadzono analizę energetyczną proponowanego rozwiązania. Obliczenia wykonano, wykorzystując dane klimatyczne roku reprezentatywnego czterech miast Polski (Poznań, Warszawy, Kołobrzegu i Krakowa). Obliczenia wykazują, że zastosowanie izolowanego złoża żwirowego pozwala zmniejszyć moc urządzenia chłodniczego (do chodzenia powietrza wentylującego) nawet o 80 %.

Należy zwrócić uwagę, że niecelowe jest zastosowanie zasobnika żwirowego do istniejącego układu klimatyzacyjnego wyposażonego w urządzenie chłodnicze. Jeżeli natomiast już w fazie projektowania przyjmie się rozwiązanie z izolowanym złożem żwirowym, wówczas zmniejszą się zarówno koszty inwestycyjne (o około 16 %) jak i eksploatacyjne (o wspomniane 80%) a więc takie rozwiązanie jest opłacalne.

Wykazano, że dla klimatyzacji komfortu możliwe jest zastosowanie akumulatora żwirowego jako jedyne źródła chłodu. Obliczenia na podstawie danych klimatycznych roku reprezentatywnego wykazały bowiem, że niedotrzymanie warunków temperaturowych w pomieszczeniu występuje tylko przez niewielką liczbę godzin. Np. w Warszawie w lipcu, temperatura w pomieszczeniu przekraczała założone 25 °C jedynie przez 18 % czasu pracy układu. Dla pozostałych miesięcy w Warszawie, a także dla innych analizowanych miast, udział ten jest mniejszy. Należy podkreślić, że tak niekorzystne warunki występują zazwyczaj przy temperaturach przekraczających temperaturę obliczeniową +30 °C.

W rozwiązaniach klimatyzacji komfortu krótkotrwale niedotrzymanie warunków temperaturowych jest tolerowane (może być dopuszczone). Zastosowanie proponowanego rozwiązania umożliwi zatem rezygnację z drogiej instalacji chłodniczej w pomieszczeniach bytowych.

9 Bibliografia

- [1] Besler G.J. i inni: “Bezprzeponowy gruntowy wymiennik ciepła i masy”, Patent PRL Nr 128261 Politechniki Wrocławskiej – BGWCiM, Wrocław 1980,
- [2] Besler G.J. i inni: „Membranloser Boden- Wärme- und Stoffaustauscher”, Patentschrift BRD Nr. P-311117.953.3.13, Deutsches Patentamt,
- [3] Besler G.J. i inni: „Membranloser Boden- Wärme- und Stoffaustauscher”, Patentschrift DDR 159206 MBWSA, Schweiz Nr. 28/74,
- [4] Besler G.J., Gryglewicz W., Kołek A., Kowalczyk W., Małecki W., i inni: Modelowanie cyfrowe bezprzeponowego gruntowego wymiennika ciepła i masy, doświadczalne badania wypełnień oraz projekt T-R zespołu wymienników. Raport Politechniki Wrocławskiej, I-13, SPR 17/83, Wrocław 1983.
- [5] Besler G.J., Gryglewicz W., Kołek A., Kowalczyk W., Małecki W., i inni: Badania wdrożeniowe i budowa zespołu gruntowych wymienników. Raport Politechniki Wrocławskiej, I-13, SPR 38/84, Wrocław 1984.
- [6] Besler G.J., Gryglewicz W., Kołek A., Kowalczyk W., Małecki W., i inni: Opracowanie wytycznych projektowania i doboru bezprzeponowych gruntowych wymienników ciepła i masy oraz badania eksploatacyjne wybudowanych zespołów wymienników. Raport Politechniki Wrocławskiej, I-13, SPR 47/85. Wrocław 1985.
- [7] Besler G.J.: Besler M., „Ocieplenie czy ochłodzenie na naszej planecie?”, Air Conditioning, Air Protection & District Heating’ 2005,,
- [8] Besler M. „Oszczędność energii przy wykorzystaniu energii z nieznaczej głębokości gruntu – wyniki badań po 18 latach eksploatacji”, Air Conditioning, Air Protection & District Heating’ 2000,
- [9] Besler M., Rdzak M., Schwitalla A. „Ponad 20 lat eksploatacji bezprzeponowych gruntowych wymienników ciepła i masy (BGWCiM) wg patentu Politechniki Wrocławskiej”, COW nr3/2005.
- [10] Besler M.: „Badania efektywności wykorzystania energii gruntu w inżynierii środowiska”, praca doktorska, Wrocław 1997.
- [11] Budzisz M., “Magazynowanie energii naturalnej dla celów kształtowania

- mikroklimatu wnętrz”, praca doktorska, Wrocław 2006.
- [12] Close D.J., Dunkle R.V., Roberson K.A.: Design and performance of a thermal storage air conditioning system. *Mech. Chem. Engg. Trans. I. E. Aust., MC4*, 45(1968).
- [13] Close D.J., Pryor T.L.: The behaviour of absorbent energy storage beds. *Solar energy*, 18, 287 (1976).
- [14] Dincer I., Rosen M. A., *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, John Wiley&Sons, Ltd, W. Brytania 2002,
- [15] Dinter F., Geyer R., Tamme R., *Thermal energy storage for commercial applications: a feasibility study on economic storage systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1991.
- [16] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings,
- [17] *Energy for the Future: Renewable Energy Sources. White Paper for a Community Strategy and Action Plan*. Brussels. COM(97)599, (1997),
- [18] Gerald H. Haug: „North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago”, *NATURE* 433, 821 – 825,
- [19] Gryglewicz W., „Zastosowanie złóż kamiennych do magazynowania ciepła w systemach wentylacyjnych”. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Wrocławska, 1989 r.
- [20] Gunn D.J., Pryce C.: Dispersion in packed beds. *Trans. Inst. Chem. Engg*, 47, T341(1969).
- [21] Jeffreson C.P.: Prediction of breakthrough curves in packed beds. I Applicability of single parameters models. *AIChE J.*, 2 409(1972).
- [22] Kürklü A., Bilgin S., „Cooling of a polyethylene tunnel type greenhouse by means of a rock bed”, *Renewable Energy* 29 (2004) 2077–2086.
- [23] Kamieński Z.: „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej w aspekcie polityki ekologicznej i energetycznej państwa”, „Tanie Ciepło Dla Budownictwa Mieszkaniowego”, II Krajowa Konferencja Naukowo – Techniczna, Wrocław, 25. kwietnia 2003 r.,
- [24] Koczyk H. „Ogrzewnictwo. Podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji

- budynków- Suplement. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002r;
- [25] Kotulski Z., Szczepiński W. „Rachunek błędów dla inżynierów”; Wydawnictwa Naukowo- Techniczne, Warszawa 2004;
- [26] Kowalczyk W. „Model wymiany ciepła i masy w bezprzeponowym gruntowym wymienniku pracującym w systemie wentylacyjnym”, praca doktorska, 1988.
- [27] Kurs Audytorów Energetycznych- materiały pomocnicze, Katedra Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006r;
- [28] Kwiecień D., “Kształtowanie mikroklimatu wewnątrz słonecznymi kolektorami hybrydowymi.” Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 1998 r.
- [29] Kyoto Protocol of the United Nations Conference of Climate Changes., Kyoto Japan, December 1997.
- [30] Lewandowski W. M.: „Proekologiczne źródła energii odnawialnej”, Warszawa 2002.
- [31] Meinrat O. Andreae: „Strong present-day aerosol cooling implies a hot future”, NATURE 435, 1187-1190,
- [32] Motzko L.: „Kälte und Wärme in Erde und Luft; Ihre Ausnutzung für technische und landwirtschaftliche Zwecke”; Manz’sche Verlagsbuchhandlung 1941.
- [33] Nowak. W, Stachel. A.: „Stan i perspektywy wykorzystania niektórych odnawialnych źródeł energii w Polsce”, Szczecin 2004.,
- [34] Ohm R.: Luftbrunnen zur Forbehandlung der Luft für Klimaanlage. Gesundheits-Ingenieur 90 (1969).
- [35] PN – ISO 5221 grudzień 1994: Rozprowadzenie i rozdział powietrza. Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie;
- [36] Popiołek Z.: „Energooszczędne kształtowanie środowiska wewnętrznego”. Praca zbiorowa pod redakcją Z. Popiołka, Gliwice 2005,
- [37] Poprawski R., Salejda W. „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki – zasady opracowania wyników pomiarów”; Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław;
- [38] Rdzak M. „Systemy kształtowania mikroklimatu w małych budynkach niskoenergochłonnych”, praca doktorska, Wrocław 2005 r.
- [39] Richard H. Tedford: „An Arctic mammal fauna from the Early Pliocene of North America”, NATURE 425, 388 – 390,
- [40] Sobański R., Kabat M.: „Odnawialne źródła energii – bariery, możliwości i sposoby

-wykorzystania w Polsce”, Rynek Instalacyjny Nr 12/2000.

[41] Sorg O. i Keller J.B.: Patentschrift Nr.211159. Zürich/ Szwajcaria 1940.

[42] Strategia rozwoju energetyki odnawialnej”; Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2000r.

[43] Tomöry T.: „Air Fountain”, Report. Hungarian Institute for Building Science ETI, Budapeszt 1970.

[44] U.S. Department of Energy, www.eere.com

[45] Vallon H.: Patentschrift Nr 1295165 BRD „Erdluftbrunnen”. Opatentowane dla firmy Rudolf Otto Meyer 1970 r.

[46] Wakao N., Kaguei S.:Heat and Mass Transfer in packed beds. Gordon and Breach SC. Publ., Nowy York 1982,

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU WEWNĘTRZNEGO
Z WYKORZYSTANIEM ŹŁÓŻ ŻWIROWYCH

Rozprawa doktorska
Załącznik

mgr inż. ADRIAN SCHWITALLA

PROMOTOR: prof. dr inż. Gerard Jan Besler

Wrocław 2007

Załącznik nr 1 – charakterystyki oraz schematy stanowisk badawczych**1. Charakterystyka oraz schemat stanowiska badawczego wymiennika gruntowego**

Na rysunku nr 1 przedstawiono schemat stanowiska badawczego wymiennika gruntowego znajdującego się przy budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

Charakterystyka wybranych elementów:

— charakterystyczne parametry wymiennika gruntowego zestawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Charakterystyka wymiennika gruntowego

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry wymiennika gruntowego	Wysokość złoża,	A	0,7	m
	Szerokość złoża,	B	0,7	m
	Długość złoża	L	5,0	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,14* 0,12**	m/s
	Strumień powietrza	V	247* 212**	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża (grys granitowy 10/20 mm)	Średnica zastępcza	d_z	13,4	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,42	-
	Gęstość	ρ_s	2680	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	815	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,243	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

* Dane z okresu listopad 2003 – marzec 2004

** Dane z okresu październik 2004 – marzec 2005

- wentylator: WP-7.6 Konwektor, $V=432 \text{ m}^3/\text{h}$, $dP=1800\text{Pa}$, $N=0,55 \text{ kW}$.
- kryza pomiarowa: średnice $D/d=125/90 \text{ mm}$,
- przepustnice regulacyjne $\phi 160$ z siłownikiem Belimo,
- temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury podłączonymi do stacji meteorologicznej „Meteo-station”,
- wilgotność powietrza mierzono w skrzynce rozprężnej, higrografami. o dokładności pomiaru 10%,
- pomiaru ciśnienia dokonywano w skrzynce rozprężnej manometrem elektronicznym Kimo MP100,

2. Charakterystyka oraz schemat stanowiska badawczego izolowanego złoża żwirowego nr 1

Na rysunku nr 2 przedstawiono schemat stanowiska badawczego izolowanego złoża żwirowego znajdującego się w hali technologicznej w budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

Charakterystyka wybranych elementów:

- charakterystyczne parametry izolowanego złoża żwirowego zestawiono w tabeli nr 2.

Tabela 2. Charakterystyka złoża żwirowego nr 1

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry złoża żwirowego nr 1	Wysokość złoża,	A	1,0	m
	Szerokość złoża,	B	1,0	m
	Długość złoża	L	4,0	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,07	m/s
	Strumień powietrza	V	252	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

- wentylator: K 160 XBTW Systemair, V=450 m³/h, N=0,108 kW.
- kryza pomiarowa: średnice D/d=125/86,5 mm,
- temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury typu KTF-20 podłączonymi do systemu BMS,
- wilgotność powietrza mierzono czujnikami wilgotności typu RH-04 podłączonymi do systemu BMS,
- pomiaru ciśnienia dokonywano manometrem elektronicznym Kimo MP100, w skrzynkach rozprężnych,

3. Charakterystyka oraz schemat stanowiska badawczego izolowanego złoża żwirowego nr 2

Na rysunku nr 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego izolowanego złoża żwirowego znajdującego się w hali technologicznej w budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

Charakterystyka wybranych elementów:

- charakterystyczne parametry izolowanego złoża żwirowego zestawiono w tabeli nr 3.

Tabela 3. Charakterystyka złoża żwirowego nr 2

	Wielkość	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Parametry złoża żwirowego nr 2	Wysokość złoża,	A	0,36	m
	Szerokość złoża,	B	0,6	m
	Długość złoża	L	1,92	m
	Prędkość przepływu powietrza w przekroju brutto złoża	w_0	0,10	m/s
	Strumień powietrza	V	78	m ³ /h
Parametry fizyczne ziaren złoża	Średnica zastępcza	d_z	24	mm
	Średnia porowatość	ϵ	0,40	-
	Gęstość	ρ_s	2670	kg/m ³
	Ciepło właściwe	c_s	924	J/(kg*K)
	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_s	2,9	W/(m*K)
	Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła złoża bez przepływu powietrza	λ_0^e	0,306	W/(m*K)
	Zawieszenie statyczne	W_{stat}	0,025	kg/kg

- wentylator: K 160 XBTW prod. Systemair, V=450 m³/h, dP= 150Pa, N=0,108 kW.
- kryza pomiarowa: średnice D/d=125/90 mm,
- przepustnice regulacyjne ϕ 160 z siłownikiem Belimo,
- temperaturę powietrza mierzono oporowymi czujnikami temperatury typu KTF-20 podłączonymi do systemu BMS,
- pomiaru ciśnienia dokonywano manometrem elektronicznym Kimo MP100, w skrzynce rozprężnej,

Wszystkie czujniki podłączone były do sterownika swobodnie programowalnego typu Excel-500 realizującego automatyczną regulację, pomiary i logikę pracy układu. Sterownik ten jest podstawowym elementem istniejącego w budynku C-6 systemu zarządzania

Adrian Schwitalla

Kształtowanie mikroklimatu wewnętrznego z wykorzystaniem źródeł zwirowych

budynkiem, instalacjami wewnętrznymi, infrastrukturą budynkową BMS (Building Management Systems).

Załącznik nr 2 – przykładowe kosztorysy oraz obliczenia kosztów eksploatacyjnych

1. Rozbudowa systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego

Koszty inwestycyjne

W tabeli nr 4 zamieszczono przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego.

Założenia:

- ceny: producentów lub z cennika Sekocenbudu na IV kwartał 2006r.

- robocizna: 8,33 zł/roboczogodzinę; (IVkw 2006),

- narzuty:

Kz - 6,8% (koszty zakupu) (IVkw 2006),

Kp - 64% (koszty pośrednie) (IVkw 2006),

Z - 12,2% (zysk) (IVkw 2006).

Łącznie nakłady inwestycyjne rozpatrywanego przypadku wyniosły 2353 zł (netto).

Tabela nr 4. Przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem regeneracji wymiennika gruntowego

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Nakłady	Cena jedn.	Koszt jedn	Ilość	Wartość
I modernizacja instalacji wymiennika gruntowego								
1	KNR 2-17 0122-02	Przewody wentylacyjne z blachy stalowej, kołowe, typ S (Spiro) o śr. do 200 mm - udział kształtek do 35 %	m2				9.4	
		-- Robocizna --						
	999	1.72*0.955=	r-g	1.6426	8.71	14.307		
		-- Materiały --						
	6507499	przewody (prostki) wentylacyjne kołowe typ S (Spiro) z blachy stalowej ocynkowanej o śr. do 200 mm	m2	0.8300	36.60	30.378		
	6507599	kształtki wentylacyjne kołowe typ S z blachy stalowej ocynkowanej o śr. do 200 mm	m2	0.2300	129.35	29.751		
	6581199	podpory kanałów (przewodów) wentylacyjnych typ C o śr. do 200 mm	szt	0.4100	11.71	4.801		
	6582299	uszczelki z gumy do przewodów wentylacyjnych kołowych o śr. do 200 mm	szt	2.0200	3.99	8.060		
	1570100	podkładki amortyzacyjne z płyty gumowej o gr. 5 mm	kg	0.1720	5.66	0.974		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług. do 50 mm	kg	0.3700	5.93	2.194		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	76.16	0.381		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0800	39.19	3.135		
Razem pozycja 1						114.061	9.400	1072.17
2	KNR 2-17 0131-02 analogia	Przepustnice jednopłaszczyznowe stalowe kołowe, typ B do przewodów o śr. do 200 mm - (z siłownikiem)	szt.				4	
		-- Robocizna --						
	999	0.49*0.955=	r-g	0.4680	8.71	4.076		
		-- Materiały --						
	6510499	przepustnice jednopłaszczyznowe stalowe kołowe typ B o śr. do 200 mm z siłownikiem	szt	1.0000	278.50	278.500		
	6582299	uszczelki z gumy do przewodów wentylacyjnych kołowych o śr. do 200 mm	szt	2.0800	3.99	8.299		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług. do 50 mm	kg	0.3800	5.93	2.253		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	289.05	1.445		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0300	39.19	1.176		
Razem pozycja 2						320.249	4.000	1281.00

Koszty eksploatacyjne

Przy analizie dodatkowych kosztów związanych ze zwiększeniem mocy wentylatora założono, że nie zmieni się moc umowna a więc nie zmieniają się opłaty stałe: opłata abonamentowa oraz składnik stały składki sieciowej.

Dodatkowy koszt pracy wentylatora określono z zależności :

$$Ke = Ee * cj \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

Ke – dodatkowy sezonowy koszt pracy wentylatora, zł/sezon

Ee – dodatkowe zużycie energii elektrycznej kWh

cj – cena jednostkowa kWh energii elektrycznej:

 cena energii zł/kWh

 stawka systemowa opłaty sieciowej zł/kWh

 składnik zmienny stawki sieciowej zł/kWh

$$Ee = z * \frac{\Delta N}{\eta} ,$$

gdzie:

z – liczba godzin pracy urządzenia, 1500 h

ΔN – zwiększenie mocy wentylatora*, 0,035 kW

η – sprawność*, 60%

*Dane odczytane z charakterystyki wentylatora

W tabeli 5 zamieszczono ceny energii elektrycznej przyjęte w analizie finansowej.

Tabela 5. Ceny energii elektrycznej przyjęte w analizie finansowej.

Miasto	Przedsiębiorstwo energetyczne	Rodzaj cen i stawek opłat		
		Cena energii	Stawka systemowa opłaty przesyłowej	Składnik zmienny stawki sieciowej
zł/kWh				
Poznań	ENEA	0,1366	0,0422	0,1055
Kołobrzeg	ENERGA	0,1467	0,0356	0,1702
Warszawa	STOEN	0,1500	0,0356	0,1191
Kraków	SUPER KRAK	0,1318	0,0415	0,1232

Przy określaniu oszczędności związanych ze zmniejszeniem zużycia energii do podgrzania powietrza założono, że nie ulegną zmianie opłaty stałe za gaz: stawka opłat abonamentowych oraz stawka opłat za usługi dystrybucji (stała).

Oszczędności finansowe związane ze zmniejszeniem zużycia energii przez nagrzewnicę zasilaną z kotła gazowego określono z zależności:

$$O_n = \Delta Vg * c_{jg} \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

O_n – sezonowa oszczędność, zł/sezon

ΔVg – zmniejszenie zużycia gazu w sezonie, m³

c_{jg} – cena jednostkowa gazu:

cena za gaz, zł/m³

stawka opłat za usługi dystrybucji (zmienna), zł/m³

Chwilowe zmniejszenie zużycia gazu wyznaczono z zależności:

$$\Delta Vg_h = \frac{3,6 \cdot Q_n}{\eta \cdot W_d}$$

gdzie:

ΔVg_h – chwilowe zmniejszenie zużycia gazu, m³/h

Q_n – chwilowe zmniejszenie mocy nagrzewnicy, kW

η – sprawność urządzenia gazowego, -

przyjęto sprawność kotła gazowego $\eta=0,8$

W_d – wartość opałowa gazu, MJ/m³

przyjęto $W_d=35,4 \text{ MJ/m}^3$ dla gazu GZ 50.

W tabeli 6 zamieszczono ceny gazu przyjęte w analizie finansowej.

Tabela 6. Ceny gazu przyjęte w analizie finansowej.

Miasto	Spółka gazownicza	Rodzaj cen i stawek opłat	
		Cena gazu	Stawka opłat za usługi dystrybucji (zmienna)
		zł/m ³	
Poznań	Wielkopolska Spółka Gazownicza	0,7486	0,4272
Kołobrzeg	Wielkopolska Spółka Gazownicza	0,7486	0,4272
Warszawa	Mazowiecka Spółka Gazownicza	0,7455	0,4385
Kraków	Karpacka Spółka Gazownicza	0,7635	0,4436

2. Budowa izolowanego złoża żwirowego o wymiarach 1 x 1 x 3,8m oraz instalacji wentylacyjnej

Koszty inwestycyjne

W tabeli nr 7 zamieszczono przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem złoża żwirowego do magazynowania chłodu.

Założenia:

- wymiary złoża żwirowego – 1m x 1m, L=3,8 m
- ceny: producentów lub z cennika Sekocenbudu na IV kwartał 2006r.
- robocizna: 8,33 zł/roboczogodzinę; (IVkw 2006),
- narzuty:
 - Kz - 6,8% (koszty zakupu) (IVkw 2006),
 - Kp - 64% (koszty pośrednie) (IVkw 2006),
 - Z - 12,2% (zysk) (IVkw 2006).

Łącznie nakłady inwestycyjne rozpatrywanego przypadku wyniosły 5310 zł (netto).

Tabela nr 7. Przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem złoża żwirowego

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Nakłady	Cena jedn.	Koszt jedn	Ilość	Wartość
II Bud. złoża żwirowego oraz fragmentu instalacji wentylacyjnej								
1	Instalacja wentylacyjna							
1 d.1	KNR 2-17 0122-02	Przewody wentylacyjne z blachy stalowej, kołowe, typ S (Spiro) o śr. do 200 mm - udział kształtek do 35 %	m2				8.2	
		-- Robocizna --						
	999	1.72*0.955=	r-g	1.6426	8.71	14.307		
		-- Materiały --						
	6507499	przewody (prostki) wentylacyjne kołowe typ S (Spiro) z blachy stalowej ocynkowanej o śr. do 200 mm	m2	0.9500	36.60	34.770		
	6507599	kształtki wentylacyjne kołowe typ S z blachy stalowej ocynkowanej o śr. do 200 mm	m2	0.1200	129.35	15.522		
	6581199	podpory kanałów (przewodów) wentylacyjnych typ C o śr. do 200 mm	szt	0.4100	11.71	4.801		
	6582299	uszczelki z gumy do przewodów wentylacyjnych kołowych o śr. do 200 mm	szt	2.0200	3.99	8.060		
	1570100	podkładki amortyzacyjne z płyty gumowej o gr. 5 mm	kg	0.1720	5.66	0.974		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług. do 50 mm	kg	0.3700	5.93	2.194		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	66.32	0.332		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0800	39.19	3.135		
Razem pozycja 1						103.493	8.200	848.64
2 d.1	KNR 2-17 0131-02 analogia	Przepustnice jednopłaszczyznowe stalowe kołowe, typ B do przewodów o śr. do 200 mm - (z siłownikiem)	szt.				2	
		-- Robocizna --						
	999	0.49*0.955=	r-g	0.4680	8.71	4.076		
		-- Materiały --						
	6510499	przepustnice jednopłaszczyznowe stalowe kołowe typ B o śr. do 200 mm z siłownikiem	szt	1.0000	278.50	278.500		
	6582299	uszczelki z gumy do przewodów wentylacyjnych kołowych o śr. do 200 mm	szt	2.0800	3.99	8.299		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług. do 50 mm	kg	0.3800	5.93	2.253		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	289.06	1.445		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0300	39.19	1.176		
Razem pozycja 2						320.249	2.000	640.50

3 d.1	KNR 2-17 0103-03 analogia	Przewody wentylacyjne z blachy stalowej, prostokątne, typ A/I o obwodzie do 1000 mm - udział kształtek do 65 % - skrzynki rozprężne 1x1x0,4m szt. 2	m2				5.2	
		-- Robocizna --						
	999	2.42*0.955=	r-g	2.3111	8.71	20.130		
		-- Materiały --						
	6505802	Kształtka went.A/I 600-1000 mm z bl. ocynk.	m2	1.0500	105.58	110.859		
	6580999	podpory kanałów (przewodów) wentylacyjnych typ A o obwodzie do 1000 mm	szt	0.2800	12.91	3.615		
	6582699	uszczelki gumowe do przewodów wentylacyjnych prostokątnych o obwodzie do 1000 mm	szt	1.9900	4.34	8.637		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług.do 50 mm	kg	0.3800	5.93	2.253		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	125.37	0.627		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0900	39.19	3.527		
Razem pozycja 3						178.412	5.200	927.74
4 d.1	KNR 2-17 0205-01 analogia	Wentylatory osiowe o śr.otworu ssącego do 400 mm z wirnikiem na wale silnika - do wentylacji przewodowej (masa do 90 kg) - wentylator śr. 200 (TD800/200 Venture industries)	szt.				1	
		-- Robocizna --						
	999	5.71*0.955=	r-g	5.4531	8.71	47.496		
		-- Materiały --						
	1342412	Śruby fundament.z koncem zawiniętym M12	kg	0.8400	7.64	6.418		
	6800702	podkładki stalowe okrągłe zgrubne do śrub M8-M16	kg	0.0300	5.81	0.174		
	2	Wentylator TD800/200 Venture Industries		1.0000	411.00	411.000		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.8000	417.59	3.341		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.1700	39.19	6.662		
Razem pozycja 4						550.086	1.000	550.09
5 d.1	KNR 2-17 0210-01	Króćce amortyzacyjne (elastyczne) o przekroju kołowym o śr.do 200 mm	szt.				2	
		-- Robocizna --						
	999	0.83*0.955=	r-g	0.7927	8.71	6.904		
		-- Materiały --						
	6580599	króćce amortyzacyjne brezentowe z kołnierzami ze stali kształtowej do przewodów wentylacyjnych o przekroju kołowym o śr.do 200 mm	szt	1.0000	57.30	57.300		

	6582299	uszczelki z gumy do przewodów wentylacyjnych kołowych o śr.do 200 mm	szt	2.0800	3.99	8.299		
	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług.do 50 mm	kg	0.3700	5.93	2.194		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.8000	67.80	0.542		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0100	39.19	0.392		
Razem pozycja 5						86.536	2.000	173.07
Razem dział Instalacja wentylacyjna								3140.04
2 Złoże żwirowe								
6 d.2	KNR 2-05 0207-01 analogia	Zbiorniki na materiały sypkie - konstrukcje wsporcze - konstrukcja złoża żwirowego z malowaniem przeciwrdzewnym	t				0.038	
		-- Robocizna --						
	999	46.5*0.955=	r-g	44.4075	8.71	386.789		
		-- Materiały --						
	2600699	deski iglaste obrzynane	m3	0.0330	501.25	16.541		
	2600999	krawędziaki iglaste	m3	0.0180	583.64	10.506		
	6804399	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym,z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami	kg	1.0000	5.27	5.270		
	1361199	kątowniki 30x30x3' 38/0.038=1000=	kg	1000.0000	2.16	2160.000		
	1511601	farba olejna do gruntowania przeciwrdzewna miniowa 60 %	dm3	0.1900	12.34	2.345		
	1330299	elektrody stalowe do spawania stali węglowych	100 szt.	0.2500	23.91	5.978		
	1540802	tlen techniczny	m3	1.8000	3.84	6.912		
	1540000	acetylen techniczny rozpuszczony	kg	0.6000	20.78	12.468		
		-- Sprzęt --						
	31114	żuraw samochodowy 5-6 t	m-g	3.1000	60.86	188.666		
	39121	ciągnik kołowy 75-85 KM	m-g	1.5000	37.76	56.640		
	39653	przyczepa dłuźycowa 10 t	m-g	1.5000	9.02	13.530		
	72111	spawarka elektryczna wirująca 300 A	m-g	2.3000	3.74	8.602		
Razem pozycja 6						3582.513	0.038	136.14
7 d.2	KNR 2-05 0207-03	Zbiorniki na materiały sypkie - płaszcze zbiorników o poj.do 100 m3	t				0.25	
		-- Robocizna --						
	999	42.72*0.955=	r-g	40.7976	8.71	355.347		
		-- Materiały --						
	2600699	deski iglaste obrzynane	m3	0.0600	501.25	30.075		
	6804399	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym,z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami	kg	0.8000	5.27	4.216		
	1110199	Blachy stalowe grube i uniwer.grub.3-12mm 377/0.377=1000=	kg	1000.0000	2.78	2780.000		

	1361199	trzpień stalowe do montażu konstrukcji stalowych	kg	0.4000	5.38	2.152			
	1511601	farba olejna do gruntowania przeciwrzeczna miniowa 60 %	dm3	0.1900	12.34	2.345			
	1330299	elektrody stalowe do spawania stali węglowych	100 szt.	0.2500	23.91	5.978			
	1540802	tlen techniczny	m3	1.8000	3.84	6.912			
	1540000	acetylen techniczny rozpuszczony	kg	0.6000	20.78	12.468			
		-- Sprzęt --							
	39121	ciągnik kołowy 75-85 KM	m-g	1.5000	37.76	56.640			
	39653	przyczepa dłuźcowa 10 t	m-g	1.5000	9.02	13.530			
	72111	spawarka elektryczna wirująca 300 A	m-g	2.1000	3.74	7.854			
Razem pozycja 7							3841.461	0.250	960.37
8 d.2	KNR 2-02 0609-01 analogia	Izolacje cieplne i przeciwdźwiękowe z płyt styropianowych poziome na wierzchu konstr.na lepiku - izolacja złoza żwirowego	m2				8		
		-- Robocizna --							
	999		r-g	0.2262	8.71	1.970			
		-- Materiały --							
	1562699	plyty styropianowe'	m2	1.0500	8.00	8.400			
	1040600	lepik asfaltowy bez wypełniaczy na gorąco	kg	1.7500	1.52	2.660			
	3950101	drewno opałowe	m3	0.0041	70.45	0.285			
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	11.35	0.170			
		-- Sprzęt --							
	34000	wyciąg	m-g	0.0073	0.00	0.000			
	39599	samochód skrzyniowy	m-g	0.0116	43.48	0.504			
Razem pozycja 8							16.884	8.000	135.07
9 d.2	KNR 2-02 0609-08 analogia	Izolacje cieplne i przeciwdźwiękowe z płyt styropianowych pionowe na lepiku bez siatki metal. - izolacja złoza żwirowego	m2				8		
		-- Robocizna --							
	999		r-g	0.2956	8.71	2.575			
		-- Materiały --							
	1562699	plyty styropianowe	m2	1.0500	8.00	8.400			
	1040600	lepik asfaltowy bez wypełniaczy na gorąco	kg	1.8500	1.52	2.812			
	3950101	drewno opałowe	m3	0.0045	70.45	0.317			
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	11.53	0.173			
		-- Sprzęt --							
	34000	wyciąg	m-g	0.0075	0.00	0.000			
	39599	samochód skrzyniowy	m-g	0.0122	43.48	0.530			
Razem pozycja 9							18.247	8.000	145.98
10 d.2	KNR 2-02 0607-02	Izolacje przeciwwilgoc.i przeciwwodne z folii polietylen.szerokiej zbiorników,basenów itp.	m2				16		

		-- Robocizna --						
	999		r-g	0.1633	8.71	1.422		
		-- Materiały --						
	1560412	folia polietylenowa szeroka (6 lub 12m) 0.2 mm	m2	1.3000	2.07	2.691		
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	2.69	0.040		
		-- Sprzęt --						
	39599	samochód skrzyniowy	m-g	0.0005	43.48	0.022		
Razem pozycja 10						5.588	16.000	89.41
11 d.2	KNR 2-01 0610-02 analogia	Drenaż - podsypka filtracyjna ze żwiru lub pospółki w gotowym suchym wykopie z przygotowaniem kruszywa - wypełnienie złoża żwirem	m3				4	
		-- Robocizna --						
	999	6.62*0.955=	r-g	6.3221	8.71	55.065		
		-- Materiały --						
	1602512	Żwir do bet.wielofrak.uziar.2-31,5mm	m3	1.1000	62.98	69.278		
Razem pozycja 11						175.843	4.000	703.37
Razem dział Złoże żwirowe								2170.34

Koszty eksploatacyjne

Przy analizie kosztów eksploatacyjnych związanych z przetłaczaniem powietrza przez złoża żwirowe założono, że nie zmieni się moc umowna a więc nie zmienią się opłaty stałe: opłata abonamentowa oraz składnik stały składki sieciowej.

Koszt pracy wentylatora określono z zależności :

$$K_e = E_e * c_j \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

K_e –sezonowy koszt pracy wentylatora, zł/sezon

E_e –zużycie energii elektrycznej kWh

c_j – cena jednostkowa kWh energii elektrycznej:

cena energii zł/kWh

stawka systemowa opłaty sieciowej zł/kWh

składnik zmienny stawki sieciowej zł/kWh

$$Ee = z * \frac{N}{\eta} ,$$

gdzie:

z – liczba godzin pracy urządzenia,	1100 h
N – moc wentylatora*,	0,038 kW
η – sprawność*,	61%

*Dane odczytane z charakterystyki wentylatora

Oszczędności wynikające ze zmniejszenia zużycia energii przez urządzenie chłodnicze:

$$Ke_{ch} = Ee_{ch} * cj \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

Ke _{ch} – sezonowe oszczędności,	zł/sezon
Ee _{ch} – zmniejszenie zużycia energii elektrycznej*	kWh
cj – cena jednostkowa kWh energii elektrycznej:	
cena energii	zł/kWh
stawka systemowa opłaty sieciowej	zł/kWh
składnik zmienny stawki sieciowej	zł/kWh

*Zużycie energii elektrycznej przez urządzenie chłodnicze odczytano z charakterystyki urządzenia.

Ceny energii elektrycznej przyjęte w analizie finansowej zamieszczono w tabeli 5.

3. Budowa izolowanego złoża żwirowego o wymiarach 2 x 7,5 x 3,8m oraz instalacji wentylacyjnej

Koszty inwestycyjne

W tabeli nr 7 zamieszczono przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem złoża żwirowego do magazynowania chłodu.

Założenia:

- wymiary złoża żwirowego – 2m x 7,5m, L=3,8 m
- ceny: producentów lub z cennika Sekocenbudu na IV kwartał 2006r.
- robocizna: 8,33 zł/roboczogodzinę; (IVkw 2006),
- narzuty:
 - Kz - 6,8% (koszty zakupu) (IVkw 2006),
 - Kp - 64% (koszty pośrednie) (IVkw 2006),
 - Z - 12,2% (zysk) (IVkw 2006).

Łącznie nakłady inwestycyjne rozpatrywanego przypadku wyniosły 16875 zł (netto).

Tabela nr 8. Przykładowy kosztorys modernizacji systemu uzdatniania powietrza z zastosowaniem złoża żwirowego

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Nakłady	Cena jedn.	Koszt jedn	Ilość	Wartość
II Bud. złoża żwirowego oraz fragmentu instalacji wentylacyjnej								
1	Instalacja wentylacyjna							
1 d.1	KNR 2-17 0101-06	Przewody wentylacyjne z blachy stalowej, prostokątne, typ A/I o obwodzie do 4400 mm - udział kształtek do 35 %	m2				70	
		-- Robocizna --						
	999	0.95*0.955=	r-g	0.9073	8.71	7.902		
		-- Materiały --						
	6505699	przewody (prostki) wentylacyjne prostokątne typ A/I z blachy stalowej ocynkowanej o obwodzie do 4400 mm	m2	0.7500	64.14	48.105		
	6505899	kształtki wentylacyjne prostokątne typ A/I z blachy stalowej ocynkowanej o obwodzie do 4400 mm	m2	0.2800	103.21	28.899		
	6580999	podpory kanałów (przewodów) wentylacyjnych typ A o obwodzie do 4400 mm	szt	0.1300	27.80	3.614		
	6582699	uszczelki gumowe do przewodów wentylacyjnych prostokątnych o obwodzie do 4400 mm	szt	0.3200	7.05	2.256		
	1570100	podkładki amortyzacyjne z płyty gumowej o gr. 5 mm	szt	0.1100	5.66	0.623		
	6801406	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M10 o dług.do 60 mm	kg	0.2500	7.12	1.780		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	85.28	0.426		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0800	39.19	3.135		
Razem pozycja 1						112.019	70.000	7841.33
2 d.1	KNR 2-17 0134-03 analogia	Przepustnice wielopłaszczyznowe stalowe prostokątne, typ A i B do przewodów o obw.do 2800 mm - z siłownikiem elektrycznym	szt.				2	
		-- Robocizna --						
	999	2.15*0.955=	r-g	2.0533	8.71	17.884		
		-- Materiały --						
	6510699	przepustnice wielopłaszczyznowe stalowe prostokątne typ A o obw.do 2800 mm	szt	1.0000	402.50	402.500		
	6580999	podpory kanałów (przewodów) wentylacyjnych typ A o obwodzie do 4400 mm	szt	1.0100	27.80	28.078		
	6582699	uszczelki gumowe do przewodów wentylacyjnych prostokątnych o obwodzie do 4400 mm	szt	2.0400	7.05	14.382		
	1570100	podkładki amortyzacyjne z płyty gumowej o gr. 5 mm	kg	1.0700	5.66	6.056		

	6801405	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M8 o dług.do 50 mm	kg	1.0600	5.93	6.286		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.5000	457.30	2.287		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.2000	39.19	7.838		
Razem pozycja 2						538.847	2.000	1077.69
3 d.1	KNR 2-17 0205-02	Wentylatory osiowe o śr.otworu ssącego do 450 mm z wirnikiem na wale silnika - do wentylacji przewodowej (masa do 125 kg)	szt.				1	
		-- Robocizna --						
	999	6.19*0.955=	r-g	5.9115	8.71	51.489		
		-- Materiały --						
	1343602	śruby fundamentowe rodzaj Z z nakrętkami M 12x160 mm	kg	0.8400	7.64	6.418		
	6800702	podkładki stalowe okrągłe zgrubne do śrub M8-M16	kg	0.0300	5.81	0.174		
		Wentylator śr. 450 JimWent 450/KAn/8		1.0000	1123.00	1123.000		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.8000	1129.59	9.037		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.1900	39.19	7.446		
Razem pozycja 3						1326.132	1.000	1326.13
4 d.1	KNR 2-17 0210-04	Króćce amortyzacyjne (elastyczne) o przekroju kołowym o śr.do 500 mm	szt.				2	
		-- Robocizna --						
	999	1.59*0.955=	r-g	1.5185	8.71	13.226		
		-- Materiały --						
	6580515	Króciec amort.brezent.kołowy fi 450 mm	szt.	1.0000	93.87	93.870		
	6582210	Uszczelka gumowa do przew. fi 300-600 mm	szt.	2.0600	5.12	10.547		
	6801407	śruby stalowe zgrubne z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości z nakrętkami i podkładkami M12 o dług.do 80 mm	kg	2.0400	7.12	14.525		
	0000000	materiały pomocnicze	%	0.8000	118.94	0.952		
		-- Sprzęt --						
	39511	samochód dostawczy 0.9 t	m-g	0.0700	39.19	2.743		
Razem pozycja 4						157.685	2.000	315.37
Razem dział Instalacja wentylacyjna								10560.52
2 Złoże żwirowe								
5 d.2	KNR 2-05 0207-09	Zbiorniki na materiały sypkie - dostarczone w całości o masie do 4000 kg	t				1.2	
		-- Robocizna --						
	999	24.4*0.955=	r-g	23.3020	8.71	202.960		
		-- Materiały --						

	2600699	deski iglaste obrzynane	m3	0.0330	501.25	16.541		
	1320599	drabiny z rur stalowych spawane	kg	3.4000	0.00	0.000		
	1511601	farba olejna do gruntowania przeciwrdezwna miniowa 60 %	dm3	0.1900	12.34	2.345		
	1330299	elektrody stalowe do spawania stali węglowych	szt	25.0000	0.00	0.000		
	1540802	tlen techniczny	m3	1.8000	3.84	6.912		
	1540000	acetylen techniczny rozpuszczony	kg	0.6000	20.78	12.468		
		-- Sprzęt --						
	31114	żuraw samochodowy 5-6 t	m-g	0.8000	0.00	0.000		
	31121	żuraw samochodowy 12-16 t	m-g	2.0000	0.00	0.000		
	39121	ciągnik kołowy 75-85 KM	m-g	1.3000	37.76	49.088		
	39653	przyczepa dłuźycowa 10 t	m-g	1.3000	9.02	11.726		
	72111	spawarka elektryczna wirująca 300 A	m-g	2.5000	3.74	9.350		
Razem pozycja 5						545.764	1.200	654.92
6 d.2	KNR 2-02 0609-03 analogia	Izolacje cieplne i przeciwdźwiękowe z płyt styropianowych poziome na wierzchu konstr.na sucho - jedna warstwa	m2				60	
		-- Robocizna --						
	999		r-g	0.0891	8.71	0.776		
		-- Materiały --						
	1562699	plyty styropianowe	m2	1.0500	8.00	8.400		
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	8.40	0.126		
		-- Sprzęt --						
	34000	wyciąg	m-g	0.0032	0.00	0.000		
	39599	środek transportowy	m-g	0.0047	0.00	0.000		
Razem pozycja 6						10.548	60.000	632.88
7 d.2	KNR 2-02 0609-12 analogia	Izolacje cieplne i przeciwdźwiękowe z płyt styropianowych pionowe na zaczynie gipsowym	m2				8	
		-- Robocizna --						
	999		r-g	0.6672	8.71	5.811		
		-- Materiały --						
	1562699	plyty styropianowe	m2	1.0500	8.00	8.400		
	1740103	gips budowlany szpachlowy	t	0.0130	0.00	0.000		
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	8.40	0.126		
		-- Sprzęt --						
	34000	wyciąg	m-g	0.0237	0.00	0.000		
	39599	środek transportowy	m-g	0.0047	0.00	0.000		
Razem pozycja 7						19.855	8.000	158.84
8 d.2	KNR 2-02 0607-02	Izolacje przeciwwilgoc.i przeciwwodne z folii polietylen.szerokiej zbiorników,basenów itp.	m2				76	
		-- Robocizna --						
	999		r-g	0.1633	8.71	1.422		

		-- Materiały --						
	1560412	folia polietylenowa szeroka (6 lub 12m) 0.2 mm	m2	1.3000	2.07	2.691		
	0000000	materiały pomocnicze	%	1.5000	2.69	0.040		
		-- Sprzęt --						
	39599	samochód skrzyniowy	m-g	0.0005	43.48	0.022		
Razem pozycja 8						5.588	76.000	424.69
9 d.2	KNR 2-01 0610-02 analogia	Drenaż - podsypka filtracyjna ze żwiru lub pospółki w gotowym suchym wykopie z przygotowaniem kruszywa - wypełnienie złoża żwirem	m3				60	
		-- Materiały --						
	1602512	Żwir do bet.wielofrak.uziar.2-31,5mm	m3	1.1000	62.98	69.278		
Razem pozycja 9						74.058	60.000	4443.48
Razem dział Złoże żwirowe								6314.81

Koszty eksploatacyjne

Przy analizie kosztów eksploatacyjnych związanych z przetłaczaniem powietrza przez złożo żwirowe założono, że nie zmieni się moc umowna a więc nie zmienią się opłaty stałe: opłata abonamentowa oraz składnik stały składki sieciowej.

Koszt pracy wentylatora określono z zależności :

$$K_e = E_e * c_j \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

K_e –sezonowy koszt pracy wentylatora, zł/sezon

E_e –zużycie energii elektrycznej kWh

c_j – cena jednostkowa kWh energii elektrycznej:

cena energii zł/kWh

stawka systemowa opłaty sieciowej zł/kWh

składnik zmienny stawki sieciowej zł/kWh

$$Ee = z * \frac{N}{\eta} ,$$

gdzie:

z – liczba godzin pracy urządzenia,	1100 h
N – moc wentylatora*,	0,330 kW
η – sprawność*,	65%

*Dane odczytane z charakterystyki wentylatora

Oszczędności wynikające ze zmniejszenia zużycia energii przez urządzenie chłodnicze:

$$Ke_{ch} = Ee_{ch} * cj \text{ [zł / sezon]}$$

gdzie:

Ke_{ch} – sezonowe oszczędności,	zł/sezon
Ee_{ch} – zmniejszenie zużycia energii elektrycznej*	kWh
cj – cena jednostkowa kWh energii elektrycznej:	
cena energii	zł/kWh
stawka systemowa opłaty sieciowej	zł/kWh
składnik zmienny stawki sieciowej	zł/kWh

*Zużycie energii elektrycznej przez urządzenie chłodnicze odczytano z charakterystyki urządzenia.

Ceny energii elektrycznej przyjęte w analizie finansowej zamieszczono w tabeli 5.