

UPROSZCZONY MODEL NUMERYCZNY GRUNTOWEGO POWIETRZNEGO WYMIENNIKA CIEPŁA WSPÓLPRACUJĄCEGO Z REKUPERATOREM W SYSTEMIE WENTYLACJI MECHANICZNEJ BUDYNKU PRZEDSZKOLNEGO

Filip BARTYZEL^{1*}, Kazimierz WOJTAS²

¹absolwent Instytutu ICiOP WiŚ PK

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: bartyzel@outlook.com

²Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza Politechniki Krakowskiej

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: k.wojtas@pk.edu.pl

Streszczenie: Stojąc w obliczu wprowadzenia obowiązku stosowania europejskich przepisów dotyczących budynków oraz ich efektywności energetycznej po 2020 roku, czyli konstruowania budynków w standardach „nZEB” (Nearly Zero-Energy Buildings) nieuniknione staje się wymaganie jak najszerzego zastosowania w nich rozwiązań opartych na pozyskaniu energii z odnawialnych jej źródeł. Jednym z nich, coraz powszechniej stosowanym w instalacjach wentylacji mechanicznej budynków jest Gruntowy Powietrzny Wymiennik Ciepła (GPWC). Jest to stosunkowo proste w budowie i działaniu rozwiązanie, w którym powietrze wentylujące przestrzeń budynku jest czerpane z zewnątrz poprzez rurowy wymiennik ciepła zagłębiony w gruncie i dzięki stosunkowo stabilnej jego temperaturze powietrze dopływające do centrali wentylacyjnej jest wstępnie podgrzewane w okresie zimowym i ochładzane w okresie letnim. Dodatkowo, w okresie występowania wysokich temperatur i potrzeby chłodzenia budynków, wykroplenie wilgoci zachodzące w GPWC pozwala na zmniejszenie nakładów energii na chłodzenie i osuszanie powietrza w centrali wentylacyjnej. W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania GPWC w budynku użyteczności publicznej (przedszkole), w którym ilość i jakość powietrza wentylacyjnego odgrywają ważną rolę w tworzeniu klimatu wewnętrznego. Zasadniczą część artykułu stanowi opis modelu matematycznego pozwalającego na wyznaczenie parametrów powietrza na wylocie GPWC przy okresowo zmiennych parametrach powietrza zewnętrznego (na wlocie do wymiennika). Jest to pierwszy etap szerzej zakrojonych prac autorów mających na celu kompleksową analizę zarówno jakościową jak i ilościową rozwiązania w opozycji do innych rozwiązań wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła.

Słowa kluczowe: nZEB, GPWC, energia odnawialna, wymiennik gruntowy

1. ZASTOSOWANIE GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA W BUDYNKU

UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ – STUDIUM PRZYPADKU

Zapewnienie niskiego zapotrzebowania budynków na energię pierwotną jest jednym z wymagań stawianych współczesnemu budownictwu. Wymóg ten podyktowany jest nie tylko prostym rachunkiem ekonomicznym, ale jest także wprost określony we współczesnych przepisach budowlanych. Wraz z rokiem 2020 w Polsce zaczną obowiązywać przepisy o tzw. nZEB – Nearly Zero-Energy Buildings. Dyrektywa Unijna (2010/31/EU) określa, że po 31 grudnia 2018 wszystkie nowe budynki użyteczności publicznej będą musiały spełniać kryteria budynków niskoenergetycznych, a wszystkie pozostałe budynki będą musiały spełniać to kryterium po 31 grudnia 2020 roku. Według powyższej dyrektywy budynki niskoenergetyczne to „budynki, które cechuje „wysoka sprawność energetyczna”, zaś niskie zapotrzebowanie energii, które będą one wymagać ma pochodzić głównie z odnawialnych źródeł wliczając w to energię produkowaną na miejscu bądź w pobliżu”.

1.1. Instalacja wentylacji w budynkach energooszczędnych

Jednym z podstawowych wymagań stawianych „budynkom energooszczędnym” jest duża szczelność powłoki budynku oraz kontrolowany strumień powietrza wentylacyjnego. Wymusza to w praktyce zastosowanie instalacji wentylacji mechanicznej, nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła. Uzyskanie wysokiego stopnia odzysku jest możliwe m.in. poprzez zastosowanie w centralach wentylacyjnych

* Autor korespondencyjny, e-mail: bartyzel@outlook.com

płytowych, przeciwprądowych wymienników ciepła (rekuperatorów) o wysokiej sprawności odzysku. Zastosowanie takiego rozwiązania wiąże się jednak z pewnymi problemami typu eksploatacyjnego, do których należą głównie podwyższone opory przepływu oraz „efekt szronienia”, czyli narastania lodu po stronie powietrza wywiewanego w okresach, w których temperatura powietrza zewnętrznego jest dużo niższa od 0°C. Jednym z powszechnie stosowanych sposobów ochrony wymiennika (rekuperatora) przeciwprądowego przed szronieniem jest zastosowanie elektrycznej nagrzewnicy wstępnej. Zastosowanie zamiast niej GPWC umożliwia nie tylko uniknięcie zużycia energii elektrycznej, obciążonej wysokim współczynnikiem nakładu energii pierwotnej, ale również pozyskanie w systemie wentylacji odnawialnej energii pochodzącej ze zgromadzonej w gruncie energii słonecznej.

1.2. Charakterystyka obiektu

Analizę, której zasadniczą część przedstawiono w artykule oparto na studium przypadku instalacji wentylacyjnej mechanicznej czterooddziałowego przedszkola zaprojektowanego w technologii energooszczędnej zlokalizowanego na terenie podkrakowskiej gminy Zielonki.

W budynku tym została zaprojektowana instalacja wentylacji mechanicznej z centralą nawiewno-wywiewną wyposażoną w przeciwprądowy rekuperator o nominalnym strumieniu powietrza nawiewanego równemu 7630 m³/h. W obliczeniach założono, że instalacja ta pracuje ze stałą wydajnością, w dni powszednie przez 10 godzin dziennie tj. od 8:00 do 18:00. W pozostałych okresach instalacja działa z wydajnością równą 10% wydajności nominalnej. Budynek składa się z 4 oddziałów przeznaczonych dla 26 dzieci. Łączna powierzchnia wentylowanych pomieszczeń wynosi 1065 m².

2. MODEL OBLICZENIOWY

Z uwagi na fakt, iż w rozważanym przypadku nie dysponowano wynikami badań a przedmiotowa analiza efektywności i opłacalności rozwiązania musiała zostać oparta na rozważaniach *a priori*, niezbędnym elementem prac, który umożliwił zrealizowanie ich celu było zbudowanie modelu obliczeniowego. Model ten, w założeniu powinien umożliwiać stosunkowo szybko i precyzyjne wyliczenie parametrów powietrza na wylocie z GPWC, czyli na wlocie do centrali wentylacyjnej, przy zmiennych danych takich jak parametry powietrza zewnętrznego (na wlocie do wymiennika), temperatury i własności gruntu, geometria rury i strumień powietrza.

2.1. Metoda elementów skończonych w rozważanym przypadku obliczeniowym

Jedną z metod pozwalających rozwiązać powyższy problem inżynierski jest metoda elementów skończonych. Metoda elementów skończonych (MES) jest metodą aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych, często stosowaną przy rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich – do obliczania zagadnień wytrzymałości materiałów, aeromechaniki, termodynamiki oraz mechaniki płynów. Jest to metoda aproksymacji, czyli otrzymywania przybliżonych rozwiązań. Ponieważ w analizowanym przypadku obliczeniowym rury wymiennika składały się głównie z odcinków prostych, zaś wymiennik był zagłębiony w gruncie na głębokości ok. 2 m, dla przyspieszenia obliczeń zdecydowano się na model jedno wymiarowy, którym węzły obliczeniowe zlokalizowano wzdłuż osi rurociągu, zakładając homogeniczny rozkład parametrów gruntu w przekroju rurociągu w każdym węźle.

2.2. Parametry powietrza zewnętrznego

Do obliczeń przyjęto parametry powietrza zewnętrznego dla tzw. typowych lat meteorologicznych uzyskanych ze strony Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa a zdefiniowanych na podstawie historycznych danych meteorologicznych. W ramach analizowanego przypadku wykorzystano dane dla stacji meteorologicznej zlokalizowanej najbliższej rozważanego budynku tj. Kraków - Balice. Obliczenia przeprowadzono w interwałach godzinowych.

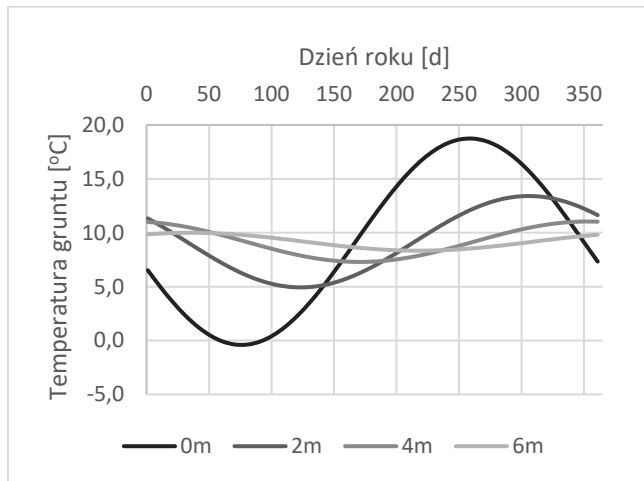
2.3. Temperatura gruntu, jako funkcja czasu i zagłębienia

Jednym z istotnych parametrów mających wpływ na wydajność cieplną GPWC jest temperatura gruntu otaczającego rurociąg. Temperatura ta w praktyce jest zmienna i zależna zarówno od czasu, jak i zagłębienia wymiennika pod powierzchnią gruntu. Z uwagi na fakt, iż liczba stacji, które prowadzą pomiar temperatury gruntu na różnych głębokościach jest znikoma i autorzy nie dysponowali wynikami rzeczywistych pomiarów zdecydowano się na opracowanie algorytmu pozwalającego oszacować temperaturę gruntu na różnych głębokościach na podstawie średniej rocznej temperatury powietrza na powierzchni gruntu oraz przewodności cieplnej tegoż gruntu. W rozpatrywanym modelu potraktowano grunt, jako ciało pół-nieskończone z jedną powierzchnią ($x=0$) wymieniającą ciepło z otoczeniem. Z tego powodu można było rozpatrywać grunt, jako przestrzeń jednowymiarową, gdzie jedynym wymiarem jest zagłębienie „z”. Jeżeli dodatkowo założy się homogeniczność struktury gruntu o stałej wartości współczynnika przewodności cieplnej, to

temperatura na danej głębokości może zostać oszacowana za pomocą następującego wzoru 1, który zaczerpnięto z [1]:

$$T(z, t) = T_m - B_s \cdot \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \cos \left[\left(\frac{2\pi}{365} \right) \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (1)$$

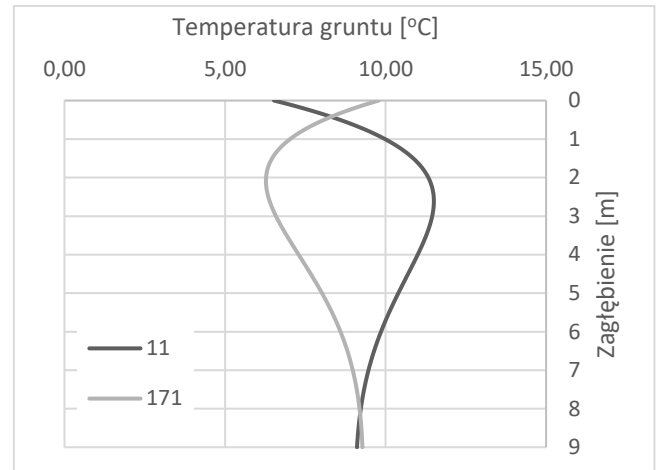
Temperatura gruntu wykazuje roczne wahania, których amplituda oraz opóźnienie czasowe zależy od parametrów fizykochemicznych gruntu. Wilgotność, porowatość, pojemność cieplna w sposób istotny wpływają na tę zmienność. Amplituda wahań wraz ze wzrastającym zagłębieniem maleje by około 8-10 metra osiągnąć stałą wartość równą średniorocznej temperaturze na powierzchni gruntu. Powyższe równanie ma zastosowanie dla gruntów o przeciętnym gradiencie geotermicznym i niewielkich zagłębieniach pod powierzchnią terenu.



Rys. 1. Roczny przebieg temperatury gruntu w zależności od zagłębienia (wg równania 1)

Fig. 1. Annual temperature variations of the soil on various deepness (based on eq. 1)

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe roczne przebiegi zmienności temperatury gruntu na różnych głębokościach wyliczone w oparciu o równanie 1. Zauważyć można, że wraz ze wzrostem głębokości maleją roczne wahania temperatury gruntu, co sugerowałoby sens umieszczania GPWC na stosunkowo dużych głębokościach. Jednak z ekonomicznego punktu widzenia jego lokalizacja na głębokościach większych niż 2 - 3 m nie przynosi oczekiwanych korzyści a wiąże się często ze znacznymi nakładami finansowymi.



Rys. 2. Temperatura gruntu w zależności od zagłębienia w 11 i 171 dniu roku (na podstawie równania 1)

Fig. 2. Soil temperature depending on the deepness in 11th and 171st days of the year (based on eq. 1)

Kolejną istotną cechą temperatury gruntu jest tzw. „przesunięcie czasowe”, tj. maksymalna temperatura gruntu występuje w innym okresie niż maksymalna temperatura powietrza na powierzchni gruntu. Zjawisko to można zaobserwować na wykresie przedstawionym na rysunku 2. Przykładowo dla 171-go dnia roku (20 czerwiec), gdy temperatura zewnętrzna jest stosunkowo wysoka temperatura gruntu na głębokości 2 metrów jest o wiele od niej niższa i wynosi tylko nieco powyżej + 6°C. Przeciwnie, dla 11 stycznia temperatura gruntu na tej głębokości wynosi ponad + 11°C i jest dużo wyższa od temperatury powietrza w tym okresie. Stanowi to dodatkowy argument za stosowaniem GPWC gdyż pokazuje duży potencjał ogrzewczy gruntu w okresie zimowym podobnie jak duży potencjał chłodniczy w okresie letnim.

2.4. Opis podstawowych założeń upraszczających zastosowanych w algorytmie obliczeniowym

Metoda elementów skończonych, szczególnie w wersji 2-D lub 3-D, może generować znaczne nakłady czasu obliczeniowego, dlatego w celu maksymalnego skrócenia czasu obliczeń dokonano przy jej zastosowaniu szeregu koniecznych uproszczeń, ale takich, które nie mają znacznego wpływu na uzyskiwane wyniki, szczególnie w kontekście ich wykorzystania do celów obliczeń o „charakterze inżynierskim”, gdzie większe znaczenie ma praktyczny aspekt rozwiązań. W obliczeniach wykorzystano następujące założenia i uproszczenia, które oparto na własnych przemyśleniach oraz wnioskach zawartych w pracy [2]:

- w czasie godzin pracy instalacji temperatura powietrza w pomieszczeniach jest regulowana i zawiera się w przedziale 21 do 24°C, wszelkie odchyłki od tych temperatur regulowane są poprzez niezależne systemy

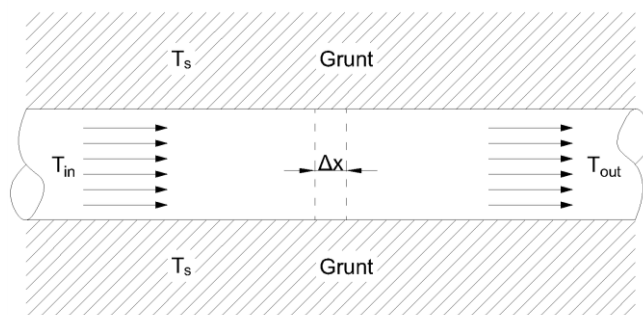
ogrzewania i chłodzenia (nie są one jednak przedmiotem analizy objętej artykułem);

- system wentylacji pracuje w dni powszednie w godzinach od 8:00 do 18:00, ze stałym wydatkiem, w pozostałych okresach pracuje z wydajnością równą 10% wartości nominalnej;
- w „zimowym trybie pracy” powietrze jest nawiewane do pomieszczeń o stałej temperaturze równej 21°C;
- obliczenia temperatury gruntu wykonano w interwałach dziennych zaś obliczenia temperatury powietrza przepływającego przez wymiennik gruntowy wykonano w interwałach godzinowych;
- GPWC ma taki sam kształt na całej długości;
- grunt ma charakter homogeniczny o stałym współczynniku przewodzenia ciepła;
- istnieje doskonałe połączenie gruntu z wymiennikiem — opory na wnikanie ciepła pomiędzy gruntem, a wymiennikiem są bliskie zeru;
- rura wykonana z betonu o grubości 0,06 m i o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$;
- współczynnik przewodzenia ciepła wymiennika U skorygowano o opory przewodzenia ciepła materiału wymiennika $R = \frac{\ln(d_z/d_w)}{2\pi\lambda}$;
- transport ciepła w gruncie odbywa się tylko i wyłącznie na zasadzie przewodzenia (transfer za pośrednictwem dyfuzji wilgoci jest pomijalny);
- przy ciśnieniu otoczenia ściśliwość powietrza jest pomijana;
- zarówno pojemność cieplna jak i współczynnik przewodzenia ciepła gruntu w otoczeniu wymiennika są na tyle duże, że przy niewielkich wartościach współczynnika wnikanie ciepła od powierzchni wewnętrznej rury do powietrza, ciepło odebrane od gruntu tylko w bardzo niewielkim stopniu wpływa na zmianę jego temperatury podczas rzeczywistej eksploatacji (czas pracy mniejszy bądź równy 10 godzin oraz przerwy świąteczne powodują „odbudowę poziomu temperaturowego gruntu wokół GPWC”).

2.5. Jednowymiarowy model wymiennika

W większości przypadków GPWC jest tylko jednym z elementów wyposażenia całego budynku. Projektanci często nie mają zbyt wiele swobody przy wyborze długości i struktury wymiennika, są ograniczeni budżetem oraz wielkością działki, na której planowany jest dany budynek. Przy projektowaniu konieczne jest, więc określenie odpowiedniej średnicy, długości i liczby rur. Ważnym pytaniem przy projektowaniu jest również to czy dodanie kolejnego metra rury lub czy dodanie kolejnej rury wpłynie znacząco na poprawę wydajności systemu przy zachowaniu odpowiedniej opłacalności inwestycji. Aby uzyskać szybką odpowiedź na te i inne pytania tego typu został opracowany prosty model typu 1-D pozwalający na symulacje

parametrów wymiennika w stanach „semi-ustalonych”, którego podstawowe cechy zostały opisane poniżej.



Rys. 3. Uproszczony model elementu wymiennika GPWC

Fig. 3. Element of simplified model of Ground Source Heat Exchanger

Równania różniczkowe cząstkowe dla wymiennika zobrazowano w poniższy sposób.

$$\dot{m} c_a dT_a = A_p f_a h_c (T_s - T_a) dx \quad (2)$$

gdzie:

h_c – współczynnik wnikanie ciepła, $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

c_a – ciepło właściwe powietrza w temperaturze T_a , $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

T_a – temperatura powietrza wewnątrz rury, $^\circ C$

T_s – temperatura otaczającego gruntu oraz wnętrza rury (założono, że jej wartość nie zmienia się podczas eksploatacji wymiennika), $^\circ C$

f_a – współczynnik korekcyjny uwzględniający ewentualne ożebrowanie rury lub inne elementy zwiększające turbulencje powietrza wewnątrz rury (w rozpatrywanym modelu przyjęto, że dla betonowej porowatej rury $f_a = 1,2$)

A_p – powierzchnia wewnętrzna rury na długości odcinka obliczeniowego, m^2

\dot{m} – przepływ masowy powietrza, kg/s

A zatem równanie 2 może zostać zapisane w następującej postaci:

$$a \frac{d\theta}{dx} + \theta = 0 \quad (3)$$

gdzie:

$$\theta = T_a - T_s \quad (4)$$

$$a = \frac{\dot{m} c_a}{A_p h_c f_a} \quad (5)$$

Współczynnik wnikanie ciepła h_c wewnątrz rury jest funkcją liczby Nusselta, średnicy rury oraz współczynnika przewodzenia ciepła dla powietrza:

$$h_c = \frac{\lambda_a Nu}{D} \quad (6)$$

Liczba Nusselta Nu powietrza płynącego wewnątrz rury zależy od liczby Reynoldsa Re , czyli od prędkości przepływu powietrza, jego własności fizycznych oraz średnicy rury. Dla przepływu turbulentnego w zakresie temperatur (-30°C do 30°C) do obliczeń liczby Nusselta użyto korelacji Dittus-Boelter'a [1]:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,3} \text{ dla chłodzenia}$$

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \text{ dla ogrzewania}$$

gdzie Pr to liczba Prandtla.

Zakładając, że na wlocie do rurociągu:

$$T_a = T_0 \text{ dla } x = 0$$

dla temperatury powietrza w odległości „ x ” od wlotu otrzymujemy:

$$T_a(x) = T_s - (T_s - T_0) \exp\left(\frac{-x}{a}\right) \quad (7)$$

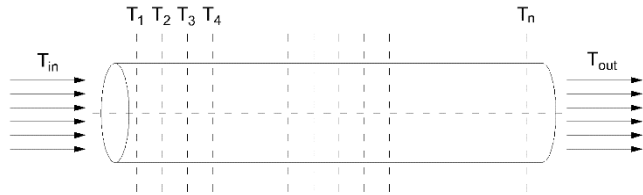
Przyrost temperatury wzdłuż rury wymiennika można, więc obliczyć za pomocą następującego równania:

$$\Delta T(L) = T_s - T_a(L) = (T_s - T_0) \left[1 - \exp\left(\frac{-L}{a}\right)\right] \quad (8)$$

gdzie L to długość odcinka rury wymiennika.

W przypadku, gdy temperatura powietrza wpływającego do wymiennika będzie wyższa od temperatury otaczającego go gruntu wówczas uzyskamy wynik o wartości ujemnej, co będzie oznaczało, że mamy do czynienia z ochłodzeniem powietrza w wymienniku.

Obliczenia prowadzono w sposób iteracyjny. Wymiennik podzielono na n równych odcinków obliczeniowych, zakończonych węzłami, dla których przeprowadzono obliczenia bilansu energii i masy.



Rys. 4. Iteracyjny model obliczeniowy wymiennika.

Fig. 4. Iterative type heat exchanger model.

Równania bilansu energii dla każdego odcinka obliczeniowego przedstawiają się następująco:

$$\dot{m} c_a (T_{n-1} - T_n) = h_c A_p f_a (T_a - T_s) \quad (9)$$

Jeżeli temperatura ścianki wymiennika w danym węźle jest niższa od temperatury punktu rosy powietrza to w obliczeniach uwzględniano również równania bilansu masy wilgoci:

$$\dot{m} (W_{n-1} - W_n) = h_m A_p \rho_a (W_a - W_s) \quad (10)$$

Równania bilansu masy oraz ciśnienia nasycenia pary wodnej zaczerpnięto z literatury [3]. Wtedy też ostateczne równanie bilansu energii i masy wygląda następująco:

$$\dot{m} c_a (T_{n-1} - T_n) + \dot{m} (W_{n-1} - W_n) H_{fg} = h_c A_p f_a (T_a - T_s) \quad (11)$$

gdzie:

h_m – konwekcyjny współczynnik transferu masy,

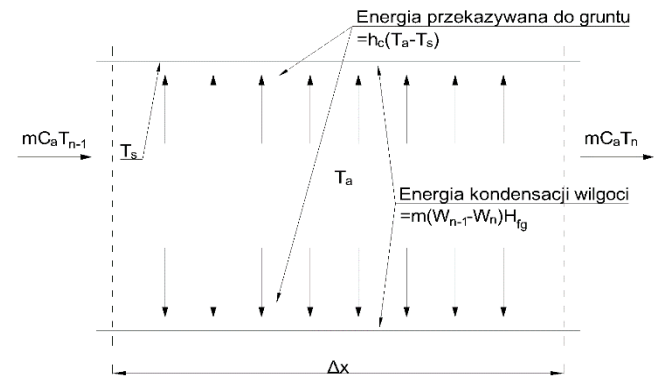
$$h_m = \frac{h_c}{\rho_a \cdot c_a}$$

T_a – średnia temperatura powietrza wewnątrz odcinka obliczeniowego wymiennika (uśredniana wg odrębnej procedury iteracyjnej), °C

ρ_a – gęstość powietrza w temperaturze T_a , $\frac{kg}{m^3}$

W_a – zawartość wilgoci w powietrzu w temperaturze T_a , $\frac{kg}{kg}$

H_{fg} – utajone ciepło parowania wody = 2501 $\frac{kJ}{kg}$



Rys. 5. Równania bilansu energii i masy dla odcinka obliczeniowego.

Fig. 5. Energy and mass balance equations for calculating element.

W modelu obliczeniowym uwzględniono zmienność własności powietrza w zależności od średniej temperatury powietrza T_a w danym odcinku obliczeniowym wg następujących zależności, kolejno dla ciepła właściwego, gęstości, współczynnika przewodności cieplnej i lepkości dynamicznej (na podstawie [3]):

$$c_a = 1030,5 - 0,19975 * T + 3,9734 * 10^{-4} * T^2 \quad (12)$$

$$\rho_a = \frac{351,77}{T} + \frac{344,84}{T^2} \quad (13)$$

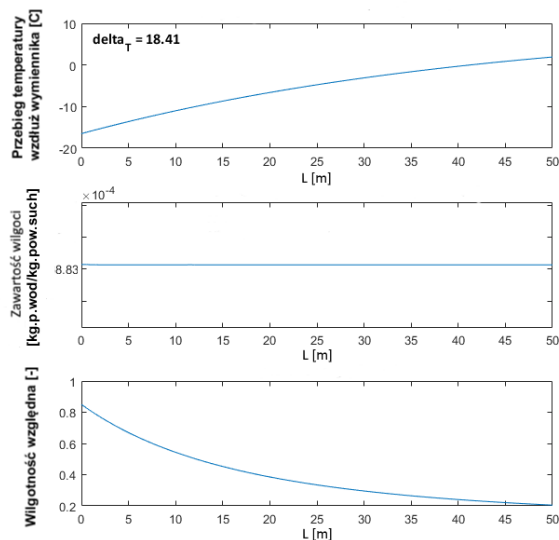
$$\lambda_a = \frac{2,334 * 10^{-3} * T^{3/2}}{164,54 + T} \quad (14)$$

$$\mu_a = \frac{1,4592 * T^{3/2}}{(109,1 + T) * 10^{-6}} \quad (15)$$

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

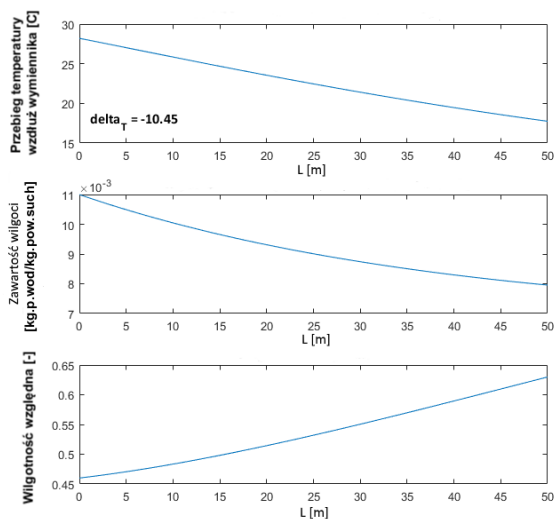
Obliczenia modelowe prowadzono z wykorzystaniem autorskiego kodu obliczeniowego napisanego w środowisku „Matlab”. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki w postaci przebiegów temperatury oraz wilgotności

powietrza wzdłuż wymiennika dla dwóch przypadków – bez kondensacji wilgoci oraz z kondensacją wilgoci.



Rys. 6. Przebieg temperatury oraz wilgotności w wymienniku dla 15 stycznia.

Fig. 6. Temperature and humidity profile along heat exchanger pipe in 15th of January.



Rys. 7. Przebieg temperatury oraz wilgotności w wymienniku dla 24 lipca.

Fig. 7. Temperature and humidity profile along heat exchanger pipe in 24th of July.

Przykładowe parametry powietrza oraz gruntu dla 15 stycznia (Rys. 6):

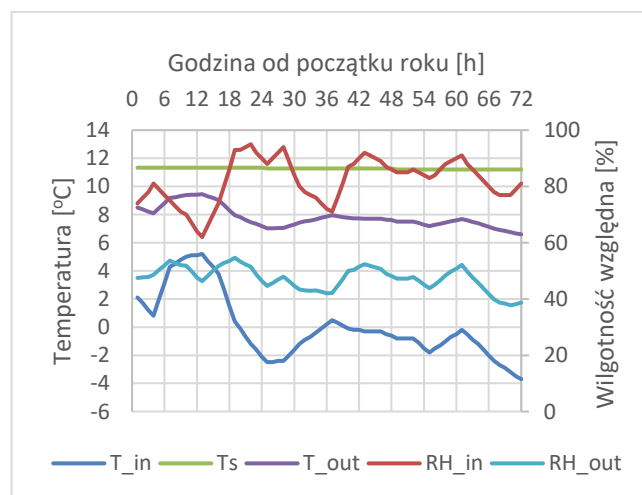
$$t_o = -16,5\text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_s = 10,33\text{ }^{\circ}\text{C} \quad RH = 0,85$$

Temperatura gruntu jest większa od temperatury powietrza na wlocie do wymiennika w wyniku, czego temperatura powietrza wzdłuż wymiennika rośnie. Przyrost temperatury ma charakter funkcji logarytmicznej. Jak można się spodziewać zawartość wilgoci nie ulega zmianie i przy ogrzewaniu powietrza dochodzi do znacznego spadku wilgotności względnej.

Dla przykładowych parametrów powietrza dla 24 lipca (rys. 7): $t_o = 28,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_s = 8,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ $RH = 0,46$

temperatura gruntu jest znacznie niższa od temperatury powietrza zewnętrznego i jest również niższa od jego temperatury punktu rosy. Podobnie jak w poprzednim przykładzie można by się spodziewać logarytmicznego przebiegu temperatury, jednakże mamy w tym przypadku do czynienia z wykraplananiem wilgoci, czyli ciepłem utajonym, które ma znaczny wpływ na przebieg temperatury powietrza w wymienniku. W związku z powyższym spadek temperatury jest mniejszy niż wynikałoby to z ilości ciepła wymienionego na drodze konwekcji z gruntem. Ponieważ jednak dochodzi w tym przypadku do naturalnego osuszania powietrza dostarczanego do budynku skutkuje to redukcją nakładów energii elektrycznej zużywanej przez agregat chłodniczy.

Obliczenia, przy założeniach takich, jakie zaprezentowano powyżej zostały przeprowadzone dla wszystkich 8760 godzin w ciągu roku, dla różnych wariantów strumieni przepływającego powietrza. Przykład niewielkiego wycinka wyników obliczeń został zaprezentowany na rysunku 8. Wyniki obliczeń przeprowadzonych w oparciu o opisany w artykule model były niezbędne do przeprowadzenia dalszych analiz energetyczno ekonomicznych mających na celu optymalizację współpracy systemu wentylacji mechanicznej z GPWC. Wyniki tych prac zostaną przedstawione przez autorów w kolejnych artykułach i prezentacjach.



Rys. 8. Parametry pracy GPWC w ciągu pierwszych 3 dni roku.

Fig. 8. Operating parameters of the Ground-to-air Heat Exchanger for first 3 days of year.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy zaprezentowano wyniki pierwszego etapu prac mających na celu stworzenie modelu współpracy gruntowego, powietrznego wymiennika ciepła (GPWC) z systemem wentylacji mechanicznej budynku. Opracowany przez autorów model, pomimo szeregu przyjętych założeń upraszczających okazał się skutecznym i wiarygodnym narzędziem umożliwiającym szybką analizę energetyczną systemu oraz jego optymalizację w aspektach zarówno wymiarowania jak i różnych strategii sterowania. Z uwagi na brak danych eksperymentalnych wyniki symulacji poddano wstępnej analizie jakościowej oraz porównano z wynikami innych programów symulacyjnych, w tym komercyjnych (uzyskując rozbieżności nieprzekraczające $0,5^{\circ}\text{C}$). W kolejnych etapach prac przewiduje się wykorzystanie stworzonego algorytmu obliczeniowego GPWC do porównań różnych koncepcji wykorzystania źródeł energii odnawialnej w celu zaspokojenia potrzeb energetycznych budynków klasy nZEB.

NUMERICAL MODEL OF THE GROUND TO AIR HEAT EXCHANGER WORKING TOGETEHER WITH COUNTER FLOW RECUPERATOR IN THE VENTILATION SYSTEM OF KINDERGARTEN

Summary: Facing implementation of the European legislation concerning EPBD and energy efficiency (EED) directives, which demands, by the year 2020 construction of the so-called nZEB (Nearly Zero-Energy Buildings) force the designers to use new energy-saving technologies in the buildings' constructions and installations. Particular attention should be paid then onto looking for opportunities of using energy from renewable resources. One of the solutions enabling the acquisition of such energy is ground-coupled heat exchanger. It is relatively simple installation, both in design and operation dedicated for heating (and/or cooling) of the air flowing through it, using the ambient heat stored in the soil. The use of ground-to-air heat exchanger (GEX) allows to stabilize temperature of the outside air supplied to the air handling unit during the season. The paper presents the concept of GEX used in a kindergarten building. An 1-D numerical model allowing simulations of the parameters of the air flowing through the heat exchanger was developed to achieve the energetic performance of the GEX all over the yearly operation. The main goal of presented model was to perform the energetic and economic comparison of the ventilation system equipped with GEX with standard Air Handling Unit equipped with counter flow recuperator supported with electric preheater.

Literatura

- [1] Cucumo M., Cucumo S., Montoro L., Vulcano A. *A one-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes*. International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 506–516
- [2] Min Zhong Zhao. *Simulation of Earth-to-Air- Heat Exchanger systems*. Department of Building, Civil and Environmental Engineering, 2004 Montreal, Canada
- [3] ASHRAE Handbook – Fundamentals 2013