

HeatMaster: jak to działa

Energia potrzebna do ogrzewania budynku ma pokryć straty ciepła przenikającego przez przegrody budowlane czyli ściany, podłogę, dach i okna do otoczenia oraz podgrzać do żądanej temperatury powietrze wentylacyjne i wodę użytkową. Ciepło dostarczane jest do domu nie tylko za pośrednictwem ogrzewania, ale też wpadającego przez okna ciepła słonecznego oraz ciepła bytowego mieszkańców (ciepło osób, ciepło urządzeń elektrycznych, ciepło z wody oraz gotowania). Wszystkie te elementy muszą zostać uwzględnione i są opisane w dokumentacji, z podziałem na straty ciepła przez przenikanie, straty energii na ogrzewanie wpadającego do domu powietrza oraz zyski ciepła.

Spis treści

Straty ciepła przez przenikanie.....	2
Różnica temperatur.....	2
Jakość izolacji	3
Mostki termiczne.....	4
Powierzchnia.....	5
Podsumowanie: straty energii przez przenikanie ciepła.....	6
Energia zużywana na ogrzewanie powietrza.....	7
Wentylacja grawitacyjna (naturalna).....	7
Wentylacja mechaniczna (rekuperator)	9
Gruntowy wymiennik ciepła	9
Czujnik stężenia CO ₂	9
Nieszczelności	10
Energia zużywana na ogrzewanie wody użytkowej	10
Zyski energii	12
Ciepło bytowe	12
Promieniowanie słoneczne	12
Ogrzewanie	13
Bilans energii.....	13
Straty ciepła urządzenia grzewczego (straty kominowe).....	13
Przeliczniki - przykład	14
Ogrzewanie wody, kolektory słoneczne	14
Energia użytkowa, końcowa i pierwotna, klasa energetyczna	15

Straty ciepła przez przenikanie

Ciepło przepływa z miejsca cieplejszego do zimniejszego – im większa różnica temperatur, słabsza izolacja i większa powierzchnia ściany, tym więcej ciepła będzie uciekać. Jak to policzyć?

Strumień energii przepływający przez przegrodę zależy od powierzchni przegrody S (im większa powierzchnia, tym więcej ciepła ucieka), od różnicy temperatur ΔT (im większa różnica temperatur pomiędzy wnętrzem budynku i otoczeniem tym więcej ciepła ucieka) oraz od współczynnika przewodzenia ciepła przegrody U (im wyższy, tym więcej ciepła ucieka). Można to zapisać jako:

$$E = S \cdot \Delta T \cdot U$$

Przyjrzyjmy się po kolei różnicy temperatur ΔT , jakości izolacji U oraz powierzchni przegród.

Różnica temperatur

Różnica temperatur ΔT po obu stronach przegrody budowlanej zależy od temperatury wewnątrz budynku T_w oraz temperatury otoczenia T_z : $\Delta T = T_w - T_z$.

Temperaturę wewnątrz (T_w) ustawiamy sami, zwykle na poziomie około 20°C.

Temperatura na zewnątrz budynku (T_z) zmienia się w cyklu rocznym. Do obliczeń dla Polski przyjęte zostały temperatury średnie:

M-c	Sty	Lut	Mar	Kwi	Maj	Cze	Lip	Sie	Wrz	Paź	Lis	Gru
$T [^{\circ}\text{C}]$	-1	-1	3	7	12	16	17	17	13	8	3	0

Tab. 1. Zmienność temperatur przy powierzchni ziemi w kolejnych miesiącach.

Temperatury nie są stałe, lecz zmieniają się – czasem są wyższe, czasem niższe od średniej. Dlatego obliczenia dla całego miesiąca są wykonywane przez rozmycie temperatur za pośrednictwem rozkładu Gaussa o $\sigma=3^{\circ}\text{C}$.

Temperatura gruntu zmienia się inaczej, niż temperatura powietrza. Dla niektórych obliczeń (związanych z ucieczką ciepła przez podłogę i z gruntowym wymiennikiem ciepła) przyjmowana jest temperatura gruntu równa średniorocznej temperaturze powietrza T_{sr} , (dla Polski 8°C) dla innych uwzględniane jest przesunięcie zmian temperatury gruntu w wyniku migracji ciepła (ciepło po lecie wędruje w głąb gruntu z opóźnieniem, podobnie postępuje wychładzanie gruntu po zimie) – tą temperaturę określamy T_G .

M-c	Sty	Lut	Mar	Kwi	Maj	Cze	Lip	Się	Wrz	Paź	Lis	Gru
$T_G [^{\circ}\text{C}]$	1	1	0	3	8	14	16	17	14	10	6	4

Tab. 2. Zmienność temperatur w gruncie na głębokości 1,5m w kolejnych miesiącach.

Najprostszym sposobem na zmniejszenie utraty energii jest oczywiście obniżenie temperatury w budynku T_z , jednak zbyt niska temperatura powoduje spadek komfortu i są granice tego postępowania. Często stosowaną praktyką jest różnicowanie temperatury w różnych pomieszczeniach i o różnych porach dnia, jednak dla prostoty interfejsu HeatMaster bazuje na obliczeniach dla jednej określonej temperatury T_w .

Jakość izolacji

Współczynnika przewodzenia ciepła przegrody U określa, jak wiele energii przepływa w ciągu sekundy przez jednostkową powierzchnię materiału o grubości 1 m, przy różnicy temperatur pomiędzy obiema stronami warstwy równej 1°C . U wyrażamy w jednostkach $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Jak można określić współczynnik U ?

Jest on odwrotnie proporcjonalny do oporu cieplnego, jaki stawiają materiały, z których jest zbudowana przegroda. Opór ten jest tym większy, im większa jest grubość warstwy materiału (d), z którego zbudowana jest np. ściana oraz im mniejsze jest przewodnictwo cieplne materiału (λ - lambda), co możemy zapisać, jako:

$$R=d/\lambda \text{ [m}^2\cdot\text{K/W]}$$

Grubość (d) wyrażamy w metrach, λ zaś to strumień energii, jaki przepływa przez jednostkową powierzchnię (jednorodnego) materiału o grubości 1 m, przy różnicy temperatur pomiędzy obiema stronami warstwy równej 1°C , wyrażony w $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$. Typowa przewodność cieplna styropianu lub wełny mineralnej jest rzędu 0,04 – taką wartość przyjmują w obliczeniach algorytmu HeatMastera.

Izolacja (której opór cieplny możemy ustalić za pomocą związku $R=d/\lambda$), jest położona na ścianie, która sama w sobie ma swój opór cieplny. Jaki będzie całkowity opór cieplny?

Całkowity opór cieplny przegrody budowlanej R_T jest sumą oporów cieplnych kolejnych warstw.

Należy pamiętać, że niezależnie od oporów stawianych przepływowi ciepła przez poszczególne warstwy przegrody budowlanej dodatkową barierą są opory przejmowania ciepła na obydwu jej powierzchniach, od strony powietrza wewnętrznego R_{si} i zewnętrznego R_{se} (współczynnik R_{si} dla poziomego kierunku strumienia cieplnego jest równy 0,13, dla powietrza płynącego w górę 0,10, a dla płynącego w dół 0,17; wartość współczynnika R_{se} przyjmowana jest 0,04).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se}$$

Przykładowo, nieizolowana ściana składająca się z 2 warstw: 1,5 cm tynku ($\lambda=0,82$) oraz 25 cm cegły ($\lambda=0,77$) będzie mieć opór cieplny

$$R_T = 0,13 + 0,015/0,82 + 0,25/0,77 + 0,04 = 0,51 \text{ [m}^2\cdot\text{K/W]} \text{ i } U=1,95 \text{ [W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$$

Opór cieplny ściany bez dodatkowej izolacji oznaczmy jako R_{T0} . W obliczeniach HeatMaster przyjmujemy całkowity opór cieplny ścian i dachu $R_{T0}=0,5$ (co odpowiada ścianie z pojedynczej cegły i tynkiem), a podłogi $R_{T0}=2$ (co odpowiada podłodze z deski sosnowej 2,4 cm z izolacją przeciwwilgociową, położonej na płycie betonowej 10 cm i warstwie piasku grubości dwudziestu centymetrów, z dodatkowym uwzględnieniem oporu przewodzenia gruntu).

Jeśli tą samą ścianę obłożymy 18 cm warstwą styropianu, sumaryczny opór cieplny wyniesie

$$R_T = R_{T0} + 0,18/0,04 = 0,51 + 4,5 = 5 \text{ [m}^2\cdot\text{K/W]} \text{ i } U=0,20 \text{ [W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})].$$

Wyrażając U przez λ , d i R_{T0} otrzymujemy

$$U=1/(R_{T0}+d/\lambda)$$

Przykładowo, przez ścianę o $U=0,2$, o powierzchni 50 m^2 z budynku o temperaturze wewnętrznej 20°C przy temperaturze otoczenia 5°C ucieka ciepło o mocy $E = 0,2 \cdot 50 \cdot (20-5) = 150\text{W}$ (czyli 0,15 kW). W ciągu doby budynek

straci więc ciepło równe $0,15 \cdot 24 = 3,6$ kWh – taką też ilość ciepła dla utrzymania w środku temperatury 20°C trzeba będzie dostarczyć do budynku.

Ten sam budynek w wersji bez izolacji ($U=1,95$) będzie tracił przez naszą ścianę ciepło w tempie $E = 1,95 \cdot 50 \cdot (20-5) = 1462,5$ W (czyli blisko 1,5 kW). W ciągu doby budynek straci więc tą drogą ciepło równe $1,5 \cdot 24 = 36$ kWh, czyli dziesięciokrotnie więcej.

Dom zbudowany w okresie	Ściana zewn. [U_s]	Dach [U_D]	Podłoga na gruncie [U_P]	Okna [U_w]
do 1984	1,20	0,85	0,50	2,60
1985÷93	0,65	0,50	0,50	2,60
1994÷2004	0,45	0,30	0,50	2,00
2005÷2010	0,30	0,30	0,50	1,60
2011÷	0,30	0,25	0,50	1,40

Tab. 3. Typowe współczynniki U dla domów budowanych w Polsce w różnych okresach.

Współczynnik U ścian, dachu i podłogi może być ustawiany na 3 sposoby: z listy wyboru, na podstawie grubości izolacji i bezpośrednio. W przypadku wyboru współczynnika U, grubość izolacji jest obliczana na podstawie zależności $d = \lambda \cdot (1/U - R_{T0})$.

Współczynnik U okien zależy od ich typu:

Typ okien	Współczynnik U_w	Współczynnik g
Jednoszybowe	5,20	0,85
Dwuszybowe stare	2,60	0,75
Dwuszybowe nowe	1,40	0,60
Trójszybowe	0,90	0,55
Trójszybowe specjalne	0,70	0,62

Tab. 4. Współczynniki U okien różnych typów. W tabeli został też umieszczony współczynnik przepuszczania energii promieniowania słonecznego przez oszklenie g, jest on istotny przy obliczeniach zysków ciepła.

Podobnie współczynnik U drzwi:

Typ drzwi	Współczynnik U
Nieenergooszczędne	3,40
Standardowe	2,60
Niskoenergetyczne	1,40
Superenergooszczędne	0,80

Tab. 5. Współczynniki U drzwi różnych typów.

Lista jest widoczna tylko dla domów jednorodzinnych – tylko dla nich w algorytmie uwzględniamy ucieczkę ciepła przez drzwi. Dla domów wielorodzinnych ucieczka ciepła przez drzwi zewnętrzne jest pomijana.

Mostki termiczne

Materiały o słabej oporności cieplnej (czyli dobrze przewodzące ciepło), takie jak stal lub beton, o ile nie są osłonięte materiałami izolacyjnymi, stanowią „autostrady” ucieczki ciepła z domu. Mostki termiczne powstają w miejscach, w których płyta balkonowa przechodzi przez ścianę balkonów i w miejscu gdzie okno osadzone jest w warstwie ściany dobrze przewodzącej ciepło. Ważny mostek cieplny, porównywalny z balkonowym powstaje też na styku ściany ceramicznej i ściany fundamentowej. W przypadku mostków termicznych obliczamy utratę ciepła na jednostkę długości.

Przykładowo, na każdy metr długości fundamentów i stopień różnicy temperatur HeatMaster przyjmuje ucieczkę ciepła równą 0,75 W. Dla okien, na każdy metr długości obwodu okna i stopień różnicy temperatur HeatMaster przyjmuje ucieczkę ciepła równą 0,45 W.

Powierzchnia

Użytkownik podaje powierzchnię domu S , liczbę pięter P oraz wysokość piętra H . W zależności od rodzaju budynku obliczana jest powierzchnia ścian, podłogi, dachu i okien (z podziałem na różne strony świata). Do obliczeń domyślnie przyjmowany jest prostopadłościenny kształt budynku (z wyjątkiem dachu, dla którego w przypadku domów 1-6 przyjmowany jest dach ukośny) – ustawienia szczegółowe powierzchni pozwalają zmienić tak wyliczone powierzchnie.

Rodzaj domu/położenie	Jednorodzinny/wielorodzinny	Ucieczka ciepła przez dach	Ucieczka ciepła przez podłogę	Powierzchnia okien pd.	Powierzchnia okien wsch./zach.	Powierzchnia okien pn.
1.	Jednorodzinny	Tak	Tak	45%	40%	15%
2.	Jednorodzinny	Tak	Tak	35%	65%	0%
3.	Jednorodzinny	Tak	Tak	0%	100%	0%
4.	Wielorodzinny	Nie	Nie	45%	40%	15%
5.	Wielorodzinny	Tak	Nie	45%	40%	15%
6.	Wielorodzinny	Nie	Tak	45%	40%	15%
7.	Wielorodzinny	Tak	Nie	35%	65%	0%
8.	Wielorodzinny	Tak	Nie	0%	100%	0%
9.	Wielorodzinny	Nie	Nie	35%	65%	0%
10.	Wielorodzinny	Nie	Nie	0%	100%	0%
11.	Wielorodzinny	Nie	Tak	35%	65%	0%
12.	Wielorodzinny	Nie	Tak	0%	100%	0%
13.	Wielorodzinny	Tak	Nie	50%	50%	0%
14.	Wielorodzinny	Tak	Nie	0%	100%	0%
15.	Wielorodzinny	Nie	Nie	50%	50%	0%
16.	Wielorodzinny	Nie	Nie	0%	100%	0%
17.	Wielorodzinny	Nie	Tak	50%	50%	0%
18.	Wielorodzinny	Nie	Tak	0%	100%	0%

Tab. 6. Lista rodzajów domów/położenia mieszkania. W ostatnich trzech kolumnach domyślna procentowa powierzchnia okien, skierowanych w różne strony świata.

Zmienne pomocnicze:

- powierzchnia piętra $S_p = S/P$;

- długości boczne ścian a (na rysunku frontowa) i b (na rysunku ściana boczna). W pierwszym przybliżeniu algorytm ustala, jaka byłaby długość boku, gdyby mieszkanie było zbudowane na planie kwadratu. W takim przypadku $a = b = \sqrt{S_p}$. Jeśli mieszkanie znajduje się w tzw. „korytarzowcu”, czyli pozycji 13-18 z Tab. 6, przyjmowana jest maksymalna głębokość mieszkania $b_{MAX} = 5$ m (głębszych mieszkań nie buduje się, gdyż byłyby zbyt ciemne), a dla pozostałych maksymalna głębokość $b_{MAX} = 10$ m. Jeśli długość boku $> b_{MAX}$, to przyjmujemy $b = b_{MAX}$ oraz $a = S_p / b_{MAX}$.

Powierzchnia ścian S_s (uwaga: przez ściany sąsiadujące z innymi mieszkaniami ciepło nie ucieka):

- dom wolnostojący: $S_s = 2 \cdot (a+b) \cdot H \cdot P$;

- bliźniak: $S_S = (2a+b) \cdot H \cdot P$;
- szeregowy: $S_S = 2 \cdot a \cdot H \cdot P$;
- blok wielorodzinny: zależnie od lokalizacji w budynku.

UWAGA: od obliczonej w ten sposób powierzchni ścian odejmowana jest powierzchnia okien (S_O): $S_{S0} = S_S - S_O$, a dla budynków jednorodzinnych także powierzchnia drzwi równa $2m^2$.

Powierzchnia dachu S_D (uwaga: przez sufit sąsiadujący z innym mieszkaniem ciepło nie ucieka):

- dom wolnostojący: $S_D = 1,2 \cdot S_P$;
- bliźniak, szeregowy: $S_D = 1,2 \cdot S_P$;
- blok wielorodzinny: zależnie od lokalizacji w budynku $S_D = 1 \cdot S_P$ lub 0.

Powierzchnia podłogi S_P (uwaga: przez podłogę sąsiadującą z innym mieszkaniem ciepło nie ucieka). Algorytm rozróżnia sytuację, w której dom jest zbudowany na fundamencie tradycyjnym (stanowi on mostek termiczny, którym ucieka ciepło) oraz sytuację, w której dom jest postawiony na płycie fundamentowej (to bardziej energooszczędne rozwiązanie).

Dom na płycie: Algorytm różnicuje temperaturę ziemi, do której ucieka ciepło, w odległości powyżej 1 m od brzegu przyjmując temperaturę otoczenia T_{SR} , a bliżej brzegu T_Z . Ta pierwsza powierzchnia podłogi to $S_{PC} = (L-2) \cdot (L-2)$, ta druga $S_{PB} = S_P - S_{PC}$.

Dom na fundamencie: Długość fundamentu zewnętrznego L_{FZ} (ciepło ucieka do ziemi o T_G) to L . Długość fundamentu wewnętrznego pod ścianami wewnętrznymi L_{FW} (ciepło ucieka do ziemi o T_G) to $L \cdot 0,5$ (ciepło ucieka do ziemi o T_{SR}). Powierzchnia podłogi $S_{PC} = (L-0,6) \cdot (L-0,6)$ (ciepło ucieka do ziemi o T_{SR}).

Powierzchnia okien S_O

- dom wolnostojący: $S_O = 0,2 \cdot S_S$;
- bliźniak, szeregowy: $S_O = 0,18 \cdot S_S$;
- blok wielorodzinny: $S_O = 0,15 \cdot S_S$.

W oparciu o S_O liczone są domyślne powierzchnie okien skierowanych w różne strony świata S_{OPd} , S_{OWZ} , S_{OPn} (nie jest to istotne z punktu widzenia utraty ciepła, ale jest istotne z punktu widzenia zysków energii słonecznej), wartości domyślne przyjmowane są zgodnie z ostatnimi trzema kolumnami tabeli 6.

Jeśli na oknach zainstalowane są rolety, straty ciepła maleją o 20%.

Dodatkowo, do ucieczki ciepła przez okna jest doliczana ucieczka ciepła przez mostki termiczne $E_{WMO} = 0,45 \cdot (T_W - T_Z) \cdot L_{MO}$, gdzie $L_{WMO} = 3 \cdot S_O$. W przypadku montażu bezmostkowego, długość mostków L_{WMO} wynosi 0.

Podsumowanie: straty energii przez przenikanie ciepła

Uciekająca przez ścianę energia (liczona w watach) $E_S = S_S \cdot U_S \cdot (T_W - T_Z)$. Do energii uciekającej przez ścianę dla domów jednorodzinnych doliczana jest energia uciekająca przez drzwi zewnętrzne równa $2 \cdot U_K \cdot (T_W - T_Z)$.

Uciekająca przez dach energia (liczona w watach) $E_D = S_D \cdot U_D \cdot (T_W - T_Z)$.

Uciekająca przez podłogę energia (liczona w watach) $E_P = S_{PC} \cdot U_D \cdot (T_W - T_{SR}) + S_{PC} \cdot U_D \cdot (T_W - T_Z) + L_{FZ} \cdot 0,75 \cdot (T_W - T_G) + L_{FW} \cdot 0,75 \cdot (T_W - T_{SR})$.

Uciekająca przez okna energia (liczona w watach) $E_W = S_O \cdot U_O \cdot (T_W - T_Z) + E_{WMO}$.

Energia zużywana na ogrzewanie powietrza

Dom nie może być szczelnym termosem – konieczna jest wymiana powietrza. Integralnym elementem domu jest wentylacja – grawitacyjna (nazywana też naturalną) lub mechaniczna. Dochodzi do tego wymiana powietrza przez otwieranie okien oraz przez nieszczelności. W każdym przypadku chcąc utrzymać w domu wymaganą temperaturę, musimy podgrzać powietrze z T_Z do T_W .

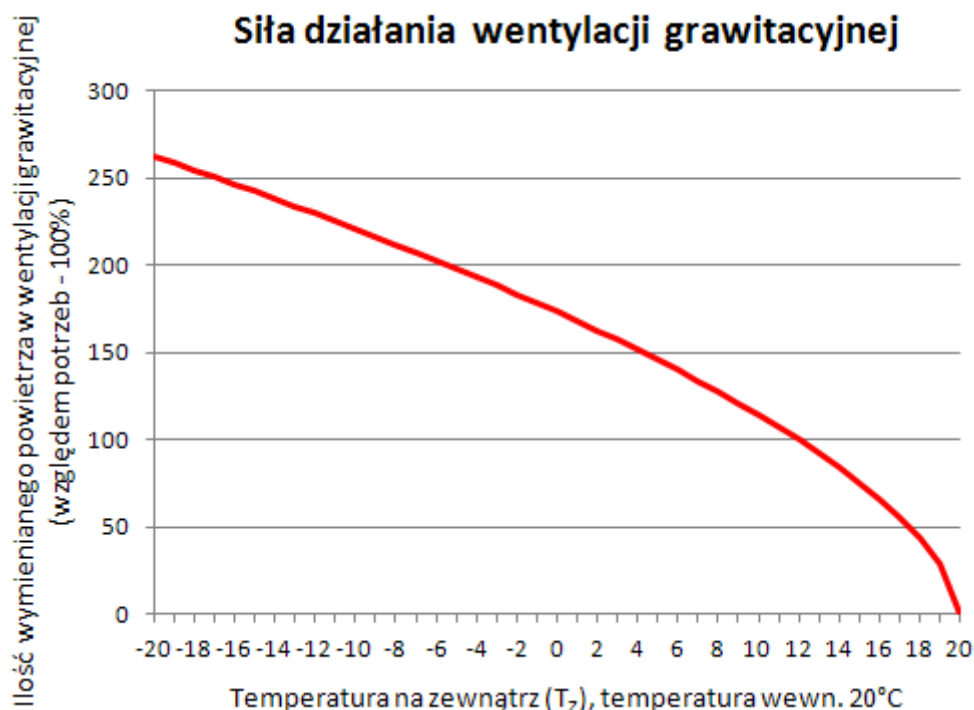
Wentylacja grawitacyjna (naturalna)

Norma wentylacyjna mówi, że objętość wymienianego w ciągu godziny powietrza V_0 powinna być równa większej z wartości:

- objętości powietrza w mieszkaniu (czyli $S \cdot H$) albo
- 50 m^3 (dla łazienki) + 30 m^3 (dla toalety) + 70 m^3 (dla kuchni z ogrzewaniem gazowym).

HeatMaster dla prostoty interfejsu przyjmuje większą z wartości: $S \cdot H$ lub 150 m^3 .

Wentylacja grawitacyjna jest budowana z myślą o wymianie powietrza przy różnicy temperatur T_W i T_Z równej 8°C (standard to $T_W = 20^\circ\text{C}$ i $T_Z = 12^\circ\text{C}$). Niestety, kiedy na zewnątrz jest cieplej, różnica temperatur maleje, przez co słabnie konwekcja, a wentylacja działa zbyt słabo (trzeba otwierać okna). Kiedy temperatura spada, konwekcja się nasila, przez co do domu spada zbyt dużo powietrza, które trzeba nagrzewać (co przy dużej różnicy temperatur staje się bardzo kosztowne energetycznie).



Rysunek 1. Wentylacja grawitacyjna (naturalna), działa optymalnie tylko przy określonej różnicy temperatur T_z i T_w . Jeśli różnica jest za mała, wymiana powietrza jest niższa od zalecanej przez normy. Jeśli różnica temperatur jest za duża, wentylacja działa zbyt intensywnie, prowadząc do wielkich strat ciepła.

Taką też zależność ilości wymienianego powietrza przyjmuje HeatMaster. Można ją przybliżyć wzorem:

$$V_p = 100\% \cdot V_0 \cdot \text{Potęga}((T_w - T_z)/8; 0,6)$$

Kiedy temperatura na zewnątrz rośnie, spada efektywność wentylacji grawitacyjnej, konieczne więc staje się wietrzenie mieszkania. Często jest też ono nadużywane przy niskich temperaturach (szczególnie, że wentylacja grawitacyjna wymienia powietrze w kuchni i łazience, a powietrze w pokojach za zamkniętymi drzwiami staje się nieświeże). To, jak dużo powietrza jest wymieniane w procesie wietrzenia, zależy od indywidualnych zwyczajów mieszkańców. HeatMaster przyjmuje objętość powietrza wymienianego przez wietrzenie:

- tylko latem (jeśli $T_z > 12$): $V_w = V_0 \cdot (T_w - T_z)/8$

- sporadycznie: $V_w = 0,5 \cdot V_0$

- często: $V_w = 1,2 \cdot V_0$

- bardzo często: $V_w = 2,0 \cdot V_0$

- non-stop $V_w = 3,0 \cdot V_0$

Znając objętość wymienianego w ciągu godziny powietrza, łatwo jest policzyć, jak wiele energii E_v na to potrzeba:

$E_v = C_p \cdot \rho \cdot (V_v + V_w) \cdot (T_w - T_z)$, gdzie C_p – ciepło właściwe powietrza 1005 J/(kg·K), ρ – gęstość powietrza 1,2 kg/m³.

Wentylacja mechaniczna (rekuperator)

Wentylacja grawitacyjna jest nieefektywna – ani nie zapewnia dobrej jakości powietrza, ani niskiego zużycia energii. Odpowiedzią na to jest wentylacja mechaniczna z użyciem tzw. rekuperatora. Można patrzeć na to urządzenie, jak na długi nos, w którym opuszczające mieszkanie powietrze oddaje swoje ciepło powietrzu wlatującemu (nie mieszając się z nim). Dzięki takiemu wstępnemu podgrzaniu powietrza wlatującego jego dalsze podgrzanie będzie wymagać mniej energii, zależnie od rodzaju rekuperatora zwykle od 60 do 85%, przez co zużycie energii spadnie za 100% do 15-40% (sprawność rekuperatora oznaczamy η).

Możemy też wymienić dokładnie tyle powietrza, ile chcemy (V_0), omijając występujący w wentylacji grawitacyjnej problem zależności ilości wymienianego powietrza od zmian temperatury. Pozwala to także wyeliminować konieczność wietrzenia ($V_w=0$) – powietrze w domu zawsze jest świeże, a do tego przefiltrowane.

Zużycie energii w przypadku wentylacji mechanicznej wyniesie więc:

$$E_V = C_p \cdot \rho \cdot V_V \cdot (T_w - T_z) \cdot \eta$$

Do tego musimy doliczyć zużycie energii przez rekuperator. Przyjmujemy zużycie prądu równe $0,35 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Przykładowo: jeśli mamy zużycie powietrza $150 \text{ m}^3/\text{h}$, to potrzebujemy mocy $150 \cdot 0,35 = 52,5 \text{ W}$; czyli w ciągu doby zużywamy dodatkowo $1,26 \text{ kWh}$ prądu, który uwzględniamy w bilansie ogrzewania powietrza.

Gruntowy wymiennik ciepła

W celu ograniczenia ilości zużywanej energii (i zapobieganiu wpadania do rekuperatora zbyt zimnego powietrza powodującego skraplanie/zamarzanie wody) można zastosować gruntowy wymiennik ciepła. Jest to zwykła (zabezpieczona np. srebrem przez bakteriami) ułożona pod ziemią rura, którą wprowadzane jest do domu powietrze. Biegąc rurą, powietrze nagrzewa się od gruntu, wpada więc do domu (i rekuperatora) wstępnie podgrzane. Stopień podgrzania powietrza zależy od szczegółów rozwiązania, algorytm HeatMaster przyjmuje temperaturę powietrza 'na wyjściu' T_{Z-GWC} równą średniej temperatur na zewnątrz T_z i temperatury gruntu T_G . A więc

$$T_{Z-GWC} = (T_z + T_G)/2$$

W takiej sytuacji do obliczania zużycia energii na wentylację T_{Z-GWC} zastępuje T_z .

Warto jeszcze dodać, że latem powietrze przebiegające przez gruntowy wymiennik ciepła ulega schłodzeniu, co zapewnia klimatyzację.

Czujnik stężenia CO_2

Można oczywiście wymieniać powietrze w ilościach zgodnych z normą – po co to jednak robić tak intensywnie, jeśli w domu nie ma mieszkańców? Z drugiej strony, kiedy w domu bawią się liczni sproszeni goście, w celu dostarczenia świeżego powietrza należałoby przyspieszyć jego wymianę. Skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie czujników stężenia dwutlenku węgla (CO_2), sterujących intensywnością działania klimatyzacji. Podczas obecności mieszkańców zapewnienie stężenia CO_2 na dość komfortowym poziomie 1000 ppm (cząsteczek na milion cząsteczek powietrza), wymaga wymiany 30 m^3 powietrza na osobę na godzinę. HeatMaster przyjmuje obecność mieszkańców przez 14 godzin przez 90% dni w roku, co oznacza konieczność podgrzania średnio $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14/24 \cdot 0,9 = 15,75 \text{ m}^3$ powietrza na godzinę.

Nieszczelności

Powietrze przenika do mieszkania przez nieszczelności przy drzwiach, oknach, izolacji dachu, kontaktach elektrycznych, rurach z wodą itp. Dom traci powietrze zgodnie ze wzorem: $V_N = 0,05 \cdot n_{50} \cdot S \cdot H$ [m³/h], a całość tego powietrza trzeba ogrzać z T_Z do T_W , z pominięciem odzysku ciepła.

Stopień szczelności	Współczynnik n_{50}
Bardzo nieszczelny	10
Nieszczelny	7
Nowy typowy	5
Nowy szczelny bez rekuperacji	3
Nowy z rekuperacją	1,5
Standard pasywny	0,6

Tab. 7. Współczynnik szczelności n_{50} .

Tracona energia to

$$E_N = C_P \cdot \rho \cdot V_{VN} \cdot (T_W - T_Z)$$

Warto zwrócić uwagę, że niskoenergetyczny dom z wentylacją mechaniczną powinien mieć wysoką szczelność – gdyby nieszczelności były duże, wymiana powietrza mogłaby być tak duża, że w ogóle nie trzeba by już dodatkowo wymieniać powietrza w wentylacji mechanicznej.

Energia zużywana na ogrzewanie wody użytkowej

Zużywamy energię na podgrzanie wody użytkowej – do kąpieli, mycia, zmywania naczyń. Wg normy w budynkach z indywidualnymi licznikami dzienne zużycie ciepłej wody (o temperaturze 55°C, podgrzewanej z 10°C) wynosi 35 litrów na osobę (jeśli liczników nie ma, zużycie jest wyższe o ok. 40%, ale ponieważ domów ze „zbiorczymi” rachunkami jest coraz mniej, dla uproszczenia interfejsu HeatMaster przyjmuje zużycie 35 l). Energia włożona w podgrzanie wody wynosi więc $E_{Wody} = C_W \cdot \rho \cdot V_{Wody} \cdot (55 - 10)$, gdzie C_W – ciepło właściwe powietrza 4190 J/(kg·K), ρ – gęstość wody 1000 kg/m³. Na osobę przypada więc $E_{Wody} = 1,83$ kWh dziennie, czyli około 55 kWh miesięcznie.

Użytkownik może zadeklarować zużycie wody różniące się od normatywnego. Do wyboru są opcje:

- bardzo małe (50% normy)
- małe (75% normy)
- przeciętne (100% normy)
- duże (150% normy)
- bardzo duże (200% normy)

Przy obliczaniu klasy energetycznej budynku uwzględniane jest normatywne zużycie wody.

Uwaga: jest to energia ciepła wody „leżącej z kranu”. Konieczne jest uwzględnienie strat występujących „po drodze” – w źródle ciepła, podczas przesyłu i utrzymywania ciepłej wody, rzeczywiste zużycie energii będzie więc większe od 1,83 kWh dziennie.

Dystrybucja	Efektywność (η_D)
Domy jednorodzinne: rury dobrze izolowane	95%
Domy jednorodzinne: rury plastikowe	85%
Domy jednorodzinne: rury nieizolowane	60%
Domy wielorodzinne: rury dobrze izolowane, automatyka	70%

Domy wielorodzinne: rury nieizolowane	50%
---------------------------------------	-----

Tab. 8. Efektywność dystrybucji wody dla różnych instalacji

Zasobnik	Efektywność (η_z)
Węzeł cieplny bez zasobnika (podłączenie do ciepłowni zewn.)	100%
Nowoczesny zasobnik dla domów niskoenergetycznych	85%
Standard lata .80-.90 XX w	65%
Stary zasobnik	50%

Tab. 9. Efektywność magazynowania wody dla różnych instalacji

Efektywność magazynowania i dystrybucji η_c możemy zapisać $\eta_c = \eta_D \cdot \eta_z$.

Przykładowo, jeśli w domu jednorodzinnym jest nowoczesna instalacja grzewcza, rury są dobrze izolowane, a zasobnik na wodę jest energooszczędny, to efektywność wykorzystania ciepła ze źródła wyniesie $0,95 \cdot 0,85 \approx 0,8$. Aby z kranu popłynęła ciepła woda dla jednej osoby (co odpowiada ciepłu $1,83 \text{ kWh}$), źródło ciepła musi wytworzyć $1,83/0,8 = 2,29 \text{ kWh}$ energii dziennie (69 kWh miesięcznie). Straty wyniosą więc $2,29 - 1,83 = 0,46 \text{ kWh}$ (choć 40% z tego przyczyni nam się do ogrzania mieszkania, co będzie uwzględnione w obliczaniu zysków energii ciepła bytowego).

Zużycie energii na podgrzewanie wody E_{WodyTot} możemy więc zapisać $E_{\text{WodyTot}} = \text{Liczba mieszkańców} \cdot E_{\text{Wody}}/\eta_c$.

Zyski energii

Dom zyskuje energię w sposób naturalny – z ciepła mieszkańców (każdy z nas jest grzejnikiem o mocy rzędu 100 W), ciepła urządzeń elektrycznych, ciepła wydzielającego się przy gotowaniu. Kolejnym ważnym źródłem ciepła jest wpadające przez okna promieniowanie słoneczne, które jest pochłaniane, a następnie wypromieniowywane w podczerwieni (która jest już przez okna zatrzymywana).

Ciepło bytowe

Algorytmy HeatMaster dla prostoty wykorzystują normatywne ciepło bytowe, nie analizując zwyczajów przebywania domowników w mieszkaniu, zużycia prądów, gotowania czy kąpieli.

Dodatkowo, do ciepła bytowego są dodawane **zyski ciepła związane z ochładzaniem wody**. Są one określane jako 40% strat energii ciepłej wody podczas dystrybucji i magazynowania. Na osobę dziennie przypada więc $E_{OW} = 0,4 \cdot 1,83 \cdot (1/\eta_D \cdot \eta_Z - 1)$. Przykładowo, dla $\eta_D \cdot \eta_Z = 0,8$ i domu zamieszkanego przez cztery osoby $E_{OW} = 4 \cdot 0,4 \cdot 1,83 \cdot (1/0,8 - 1) = 0,732$ kWh dziennie.

Ciepło bytowe jest przyjmowane jako $E_B = 5,3 \cdot (55 \cdot \text{Liczba mieszkańców} + 235)/365 + E_{OW}$ [kWh/d].

Promieniowanie słoneczne

Przez okna wpada promieniowanie słoneczne. Na 1m^2 powierzchni przypada miesięcznie (średnia dla stacji Warszawa Bielany, Sulejów, Święty Krzyż) kWh:

Miesiąc	90S (N_{pd})	90E; 90W (N_{WZ})	90N (N_{pn})
1	31	17	13
2	51	31	23
3	77	55	39
4	80	69	46
5	88	89	63
6	82	90	68
7	88	89	68
8	90	80	52
9	75	53	35
10	62	34	21
11	35	16	11
12	23	10	8

Tab. 10. ilość energii padającej miesięcznie na 1m^2 ustawiony pionowo w kierunku południowym (N_{pd}), wschodnim/zachodnim (N_{WZ}) i północnym (N_{pn}).

Algorytm zysku energii słonecznej uwzględnia też:

- współczynnik g przenikania promieniowania słonecznego przez okna, zależny od rodzaju szyb, jak w Tab. 4.
- redukcję zysku energii (do 70%), związaną z częściowym zasłonięciem powierzchni okien przez ściany, ramy, firanki, ucieczkę odbitego światła z mieszkania itp.).

Zyski energii słonecznej w miesiącu są przyjmowane jako: $E_{SOL} = g \cdot 0,70 \cdot (N_{pd} \cdot S_{OPd} + N_{WZ} \cdot S_{OWZ} + N_{pn} \cdot S_{OPn})$ [kWh]

Ogrzewanie

Bilans energii

Bilans cieplny obejmuje z jednej strony straty energii, z drugiej jej zyski. Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania Q jest równe:

$$Q = (E_s + E_D + E_P + E_V + E_N) - (E_{SOL} + E_B).$$

Jeśli zyski są większe (ma to miejsce w okresie letnim), zmniejszany jest współczynnik E_{SOL} , jeśli pomimo to zyski są większe od strat, zmniejszane jest E_B .

Dostarczenie ciepła Q może odbywać się za pomocą wielu różnych urządzeń:

Źródło ogrzewania	Sprawn. η (c.o.)	Sprawn. η (c.w.u.)	Dom jednorodz.	Dom wielorodz.
Kocioł na pellety	80%	80%	✓	-
Kocioł na drewno	75%	75%	✓	-
Ciepłownia	98%	97%	✓	✓
Elektrociepłownia	98%	97%	✓	✓
Piec kaflowy (węgiel)	40%	-	✓	-
Kocioł węglowy (stary)	60%	-	✓	-
Kocioł węglowy (nowy)	80%	-	✓	-
Kocioł gazowy starego typu (gaz)	70%	65%	✓	✓
Kocioł gazowy nowego typu (gaz)	88%	88%	✓	✓
Kocioł gazowy kondens. (gaz)	98%	90%	✓	✓
Kocioł gazowy standard (propan)	88%	88%	✓	✓
Kocioł gazowy kondens. (propan)	97%	90%	✓	✓
Terma gazowa z zapłonem elektrycznym	-	75%	✓	✓
Terma gazowa z zapłonem dyżurnym	-	70%	✓	✓
Kocioł olejowy	88%	88%	✓	✓
Ogrzewanie elektryczne	100%	100%	✓	✓
Pompa ciepła	300%	280%	✓	✓

Tab. 12. Urządzenia grzewcze wraz z ich sprawnością i zastosowaniami.

Straty ciepła urządzenia grzewczego (straty kominowe)

Część ciepła wytwarzanego w urządzeniu grzewczym (np. piecu węglowym lub gazowym) jest tracona - zamiast ogrzewać mieszkanie/wodę, ulatnia się kominem (dlatego też czasem określa się je jako 'straty kominowe').

Przykładowo, jeśli urządzenie grzewcze ma sprawność 70%, to z każdych spalonych 10 kWh paliwa, tylko 7 kWh służy nam jako energia użytkowa, a 3 kWh jest tracone, co HeatMaster pokazuje jako osobną strzałkę uciekającego ciepła.

Urządzenia takie jak piecyki elektryczne zamieniają w ciepło 100% pobieranej energii prądu.

Szczególnym urządzeniem jest pompa ciepła, która pobierając 1 kWh prądu potrafi wytworzyć np. 3,5 kWh ciepła, przy czym 2,5 kWh energii jest pobierane z otoczenia (w tym przypadku strzałka odwraca się i zmienia kolor na zielony).

Przeliczniki - przykład

Zużycie paliwa, koszt i emisja CO₂ są określane w oparciu o dane paliwa, zapotrzebowanie na energię i sprawność instalacji.

Paliwo	Cena [PLN/kWh]	Emisje CO ₂ [kg/kWh]	Uwagi/przeliczniki
Pellety	0,22	0,030	5 kWh/kg
Drewno	0,12	0,030	4 kWh/kg
Ciepłownia	0,22	0,400	1 GJ=278 kWh
Elektrociepłownia	0,22	0,080	1 GJ=278 kWh
Węgiel	0,12	0,380	6,5 kWh/kg
Gaz	0,20	0,201	8,7 kWh/m ³
Propan	0,32	0,225	12,8 kWh/kg
Olej opałowy	0,40	0,276	11,2 kWh/kg; 9,4 kWh/l
Prąd	0,58	0,900	

Tab. 13. Dane paliw: koszt, emisja CO₂, przeliczniki

PRZYKŁAD: dostarczenie 1000 kWh energii za pomocą kotła olejowego o sprawności $\eta=85\%$ będzie wymagać spalania paliwa o energii $1000/0,85=1176,5$ kWh. Aplikacja proponuje domyślną cenę kosztu 1kWh równą 0,4 zł, czyli koszt wyniesie 470 zł. Ponieważ energia oleju opałowego to 11,2 kWh/kg, więc trzeba spalić $1176,5/11,2=105$ kg oleju opałowego. Ponieważ emisja dwutlenku węgla to 0,276 kg/kWh, będzie się to wiązać z emisją dwutlenku węgla równą $1176,5 \cdot 0,276 = 325$ kg.

Ogrzewanie wody, kolektory słoneczne

Energia na ogrzewanie wody E_{WodyTot} jest najpierw zaspokajana za pomocą kolektorów słonecznych, pozostała energia jest zaspokajana z pomocą urządzenia grzewczego, analogicznie jak w przypadku ogrzewania powietrza. Straty ciepła związane z wydajnością urządzenia grzewczego również są uwzględniane w stratach kominowych.

Jedyny nowy element, wymagający dodatkowego wyjaśnienia, to kolektory słoneczne.

Tabela poniżej pokazuje średnią ilość energii słonecznej docierającej miesięcznie do powierzchni Ziemi w Polsce środkowej.

Miesiąc	30°	45°	60°	90°
I	25	28	29	28
II	45	48	50	46
III	79	81	80	70
IV	109	107	99	75
V	144	136	106	74
VI	143	132	102	66
VII	142	133	105	71
VIII	131	126	106	76
IX	93	94	90	73
X	62	65	66	58
XI	28	30	32	30
XII	17	19	21	19

Tab. 14. Średnia ilość energii słonecznej docierającej miesięcznie do powierzchni Ziemi w Polsce środkowej.

Widać znaczne wahania ilości energii – zimą jest jej stosunkowo niewiele, za to latem (kiedy nie potrzebujemy ciepła do ogrzewania). Z tego powodu zazwyczaj kolektorów słonecznych nie używa się do ogrzewania domów (bo dostarczenie potrzebnej energii zimą wymagałoby olbrzymich, kosztownych kolektorów, za to nadwyżka ciepła latem byłaby olbrzymia, a nieodebrana z kolektorów doprowadziłaby do ich przegrzania i zniszczenia).

Kolektory słoneczne stosuje się zwykle do ogrzewania wody – w zależności od instalacji mogą one pokryć prawie całość zapotrzebowania energii na ogrzewanie wody w okresie od maja do sierpnia, a w dużym stopniu nawet od marca do października.

Jak duża powinna być powierzchnia kolektorów i ile ciepła mogą dostarczyć? W poprzednim punkcie obliczyliśmy ilość energii potrzebnej do podgrzania wody dla jednej osoby (ze stratami na dystrybucję i magazynowanie) na poziomie 69 kWh miesięcznie.

Powszechnie stosowane są dwa typy kolektorów: tańsze kolektory płaskie o efektywności 30% oraz droższe kolektory próżniowe o efektywności 50%. Tak wygląda ilość energii pozyskiwanej miesięcznie przez 1m² kolektora ustawionego w kierunku południowym pod kątem 45° (bez uwzględnienia strat przy dystrybucji i magazynowaniu ciepła, przy ich uwzględnianiu algorytmy HeatMaster wykorzystują do obliczeń współczynniki z tabel 8 i 9).

Miesiąc	Energia słońca [45°]	Kolektor płaski	Kolektor próżniowy
I	28	8,4	14
II	48	14,4	24
III	81	24,3	40,5
IV	107	32,1	53,5
V	136	40,8	68
VI	132	39,6	66
VII	133	39,9	66,5
VIII	126	37,8	63
IX	94	28,2	47
X	65	19,5	32,5
XI	30	9,0	15
XII	19	5,7	9,5

Tab. 15. ilość energii pozyskiwanej miesięcznie przez 1m² kolektora ustawionego w kierunku południowym pod kątem 45° (bez uwzględnienia strat przy dystrybucji i magazynowaniu ciepła).

Zapewnienie miesięcznie 69 kWh ciepła do podgrzania wody w okresie maj-sierpień wymaga dwóch metrów kwadratowych kolektora płaskiego lub trochę ponad metra kwadratowego kolektora próżniowego. Dwa metry kwadratowe kolektora próżniowego są w stanie dostarczyć prawie całości ciepła w okresie marzec-październik. Trzeba jednak mieć na uwadze możliwość przegrzewania się kolektora w lecie i albo stosować przysłony, albo automatykę zapobiegającą przegrzaniu glikolu). Coraz częściej spotykanym rozwiązaniem jest gromadzenie nadwyżki ciepła latem w gruntowym magazynie ciepła, a następnie odzyskiwanie ciepła zimą do podgrzewania budynku – rozwiązanie takie może nawet w całości zaspokoić potrzeby grzewcze budynku niskoenergetycznego.

Algorytmy HeatMaster w pierwszej kolejności obliczają ilość energii dostarczanej przez kolektory słoneczne, a następnie (o ile ich ciepło nie wystarcza), dogrzewają wodę użytkową innym zdefiniowanym źródłem ciepła. Jeśli energia dostarczana przez kolektory jest większa od potrzebnej do ogrzewania wody, nadwyżka jest pomijana.

Energia użytkowa, końcowa i pierwotna, klasa energetyczna

Ciepło, które zużywa budynek to **energia użytkowa**. Energię tę dostarcza urządzenie grzewcze, jednak nie musi się to odbywać ze 100% sprawnością. Przykładowo, jeśli w domu jest kocioł gazowy o sprawności 80%, oznacza to, że tylko 80% energii urządzenia grzewczego zamieni się w energię użytkową. Jeśli więc potrzebujemy 1000 kWh energii użytkowej, to nasz kocioł o sprawności $\eta=80\%$ musi zużyć $1000 \text{ kWh} / 0,8 = 1250 \text{ kWh}$ gazu. To właśnie taką ilość energii trzeba zakupić - energię tę określa się mianem **energii końcowej**, obejmuje ona łącznie **energję użytkową i straty kominowe**.

Energię końcową oblicza się, dzieląc energię użytkową przez sprawność η urządzenia grzewczego. Szczególnym urządzeniem jest pompa ciepła - potrafi ona jednostkę energii prądu przetworzyć na 3,5 jednostki ciepła (czyli np. 1kWh prądu zamienić w 3,5 kWh ciepła). Stąd dla takiego urządzenia przyjmujemy sprawność $\eta=350\%$.

Na świadectwach energetycznych można znaleźć energię końcową zużywaną na $1m^2$ powierzchni budynku (EK), jednak eksponują one energię pierwotną. Zapotrzebowanie na nieodnawialną **energię pierwotną** (EP) to wielkość wyrażająca energię, która musi być wydobyta u źródła, żeby pokryć zapotrzebowanie na ogrzewanie domu, przygotowywanie ciepłej wody użytkowej, ewentualną wentylację mechaniczną, chłodzenie (w domach z klimatyzacją) oraz na pracę napędów. Wartość ta pokazuje, ile faktycznie zużyjemy energii pierwotnej nieodnawialnej, aby zaspokoić te potrzeby, na przykład ile węgla albo gazu trzeba wydobyć. Przykładowo, z każdej kWh energii węgla spalane w kopalni, tylko około 35% zamienia się w prąd, a po uwzględnieniu strat w sieci do odbiorcy w formie prądu dociera tylko 1/3 energii zawartej pierwotnie w węglu. Dlatego w przypadku ogrzewania prądem 1000 kWh energii finalnej oznacza zużycie 3000 kWh energii pierwotnej. Współczynniki przeliczania energii końcowej na energię pierwotną są umieszczone w poniższej tabeli.

Źródło energii	Współczynnik przeliczenia $E_k \rightarrow E_p$
Kocioł na pellety	0,2
Kocioł na drewno	0,2
Ciepłownia	1,3
Elektrociepłownia	0,8
Piec kaflowy (węgiel)	1,1
Kocioł węglowy (stary)	1,1
Kocioł węglowy (nowy)	1,1
Kocioł gazowy starego typu (gaz)	1,1
Kocioł gazowy nowego typu (gaz)	1,1
Kocioł gazowy kondens. (gaz)	1,1
Kocioł gazowy standard (propan)	1,1
Kocioł gazowy kondens. (propan)	1,1
Terma gazowa z zapłonem elektrycznym	1,1
Terma gazowa z zapłonem dyżurnym	1,1
Kocioł olejowy	1,1
Ogrzewanie elektryczne	3,0
Pompa ciepła	3,0

Tabela 16. Współczynniki nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w_i na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii lub energii do budynku.

Pojęcie klasy energetycznej nie jest formalnie zdefiniowane prawem, ale dla orientacji HeatMaster oblicza ją w oparciu o roczne zużycie energii końcowej na $1m^2$ powierzchni budynku.

Zużycie energii końcowej [$kWh/(m^2 \cdot r)$]	Klasa energetyczna
[250; $+\infty$)	F
[150; 250)	E
[100; 150)	D
[80; 100)	C
[45; 80)	B
[25; 45)	A
[15; 250)	A+
[0; 15)	Pasywny

Tabela 17. Klasy energetyczne w funkcji zużycia energii.

Bibliografia

1. ROZPORZADZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej. [Link](#).
2. Polska Norma Budowlana: PN-B-02025:2001 „Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego”. [Link](#).
3. Chudzicki J. Instalacje ciepłej wody w budynkach (skrót). [Link](#).
4. J. Sowa. Wentylacja domów „ładnych i ładnych inaczej...”. [Link](#).
5. Ministerstwo Środowiska: Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2009 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2012. [Link](#).