Iceland Liechtenstein Norway grants

Norway grants

Poprawa efektywności wykorzystania energii geotermalnej przez dopasowanie charakterystyki odbiorcy

User4GeoEnergy

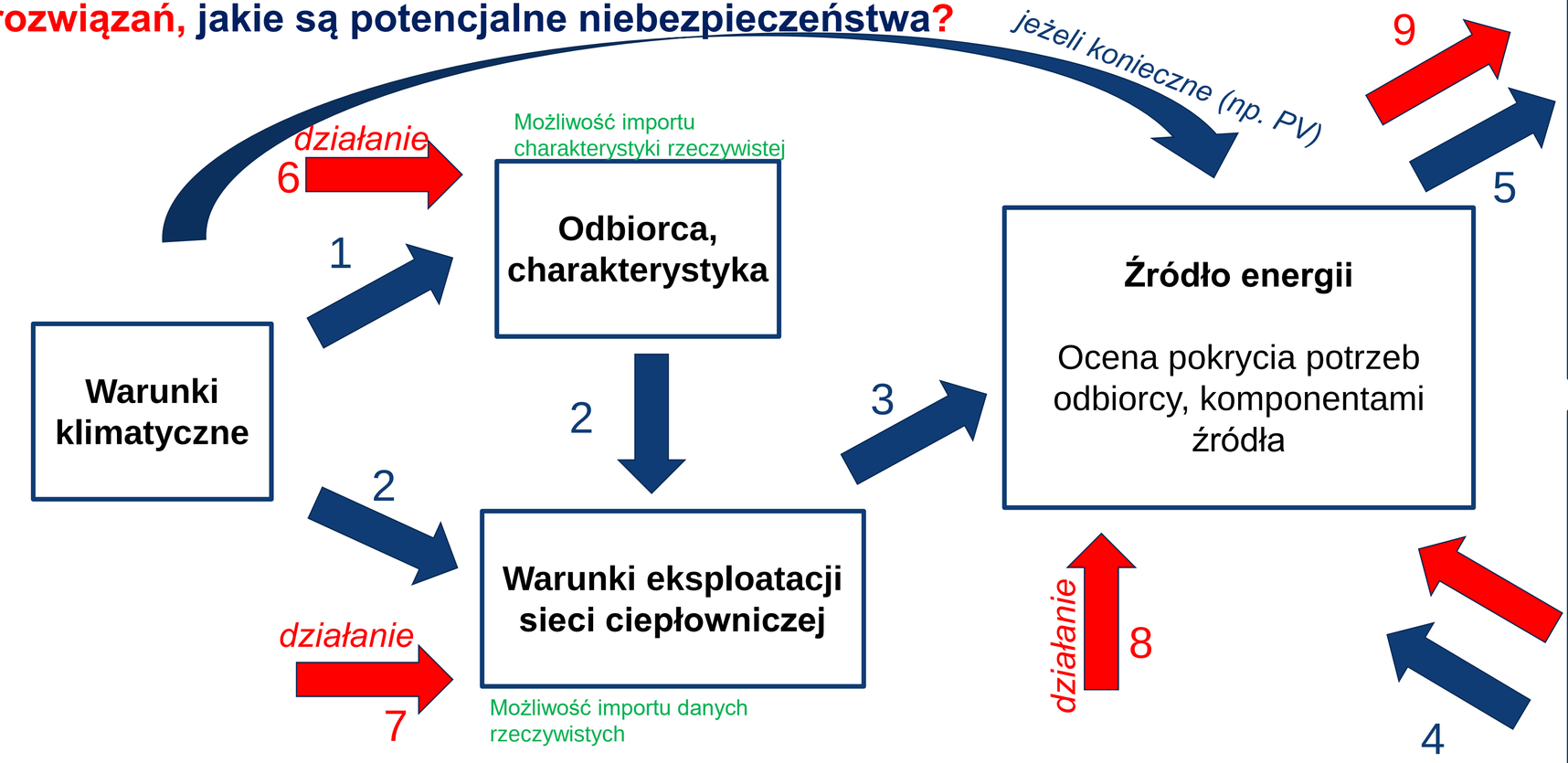
Modelowanie warunków i efektów pracy geotermalnych systemów ciepłowniczych, metodyka

Leszek Pająk

IGSMiE PAN, Kraków 2023.09.21

Jak pracujemy?

Celem jest opracowanie modelu będącego w stanie odpowiedzieć na pytania: (1) czy warto zmieniać charakterystykę odbiorcy energii? (2) jakich efektów tych działań możemy się spodziewać? (3) jakie są zalety i wady proponowanych rozwiązań, jakie są potencjalne niebezpieczeństwa?



Przetwarzanie danych – wyniki:

- Określenie **ilości energii produkowanej przez poszczególne źródła**
- Ocena **konsumpcji nośników energii**, wliczając konsumpcję na pompowanie płynu geotermalnego (eksploatacja, zatłaczanie) i pompy obiegowe
- **Emisja zanieczyszczeń**
- Ocena wymaganych nakładów inwestycyjnych **CAPEX**
- Ocena kosztów zmiennych **OPEX**
- Określenie **wskaźników**: **ekonomicznych**, **techno-ekonomicznych**, **techniczno-ekologicznych, ekologiczno-ekonomicznych**
- Interpretacja, krok 1

Data interpretation step 2 (action → result)

Baza danych

1. informacje na temat działającej instalacji – stan obecny (wykorzystanie na etapie kalibracji modelu)

2. Ceny nośników energii

3. Wskaźniki nakładów inwestycyjnych:
   - modernizacja, wymiana sieci ciepłowniczej,
   - modernizacja, usprawnienia instalacji odbiorców energii, termomodernizacja
4. Inne dane użyteczne do celów prognostycznych

1 krok – kalibracja modelu w znanych warunkach pracy

2 krok – ocena efektów proponowanych zmian

działanie = modernizacja

Co chcieliśmy zrobić

Celem nie jest opracowanie narzędzia do projektowania, ale do wspomagania procesów decyzyjnych.

Oba modele mają możliwie prosto opisać ilościowo najistotniejsze procesy i zjawiska.

U4GEfm

User**4G**eo**E**nergy **f**ull **m**odel

Opracowanie narzędzia informatycznego wyposażonego w zestaw bibliotek, które pozwolą ujmować wpływ temperatury pracy instalacji grzewczej wykorzystywanej przez odbiorców, na efekty pracy systemu.

System energetyczny:
źródło – przesył – dystrybucja – odbiorca

Zaleta narzędzia: ujęcie wpływu temperatury na efekty, efekty techniczne, ekonomiczne i ekologiczne.

Wada: czasochłonność w implementacji modelu

U4GEcalc

User**4G**eo**E**nergy **calc**ulator

Proste narzędzie informatyczne dostępne nieodpłatnie, które pozwoli pokazać efekty stosowania popularnych zabiegów zmieniających charakterystykę odbiorcy.

System energetyczny:
źródło – przesył i dystrybucja – odbiorca

Zaleta narzędzia: łatwość wykorzystania, wykorzystanie bazy danych o nośnikach energii i kosztach zabiegów termomodernizacyjnych

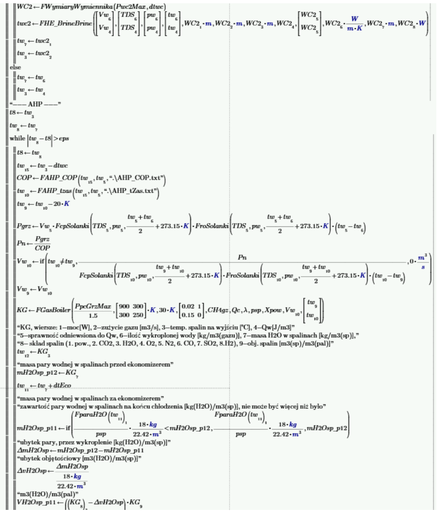
Wada: akceptacja stosowania pewnych założeń i uogólnień

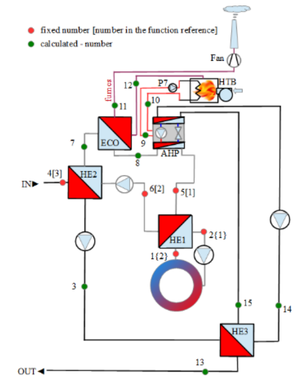
Różnica – łatwość użycia, elastyczność, możliwość rozbudowy, wymagania wobec użytkownika.

Ten sam cel, co do zakresu

U4GEfm

User4GeoEnergy full model (biblioteki PTC MathCad)





N – number of a calculation node
[n] number of a row of the input vector
(n) number of nodes, included to calculations only if designe power of HE1 > 0 W.
Nodes 5 and 6 are then unknown. The solution is alternative.

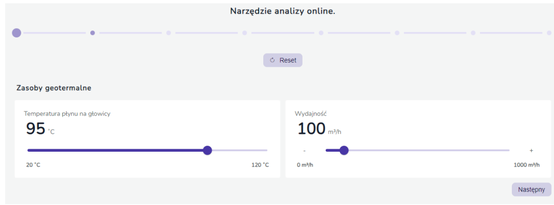
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3
O1	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
O2	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
O3	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
O4	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
O5	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
O6	1000.e3	50.0	30.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	100.e3	55.0	10.0		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3
DHchar	7000.e3	70.0	40.0	20.0	-20.0	1.25	0.33	12.0	700.e3	70.0	30.0	0.35	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3
GEOM	90.	1.											
D1	5.e2	0.3	0.503	1.0	1.1004	50.	0.035	2.0	1.5	2.			
D2	1.e3	0.3	0.303	0.6	0.6004	50.	0.035						
D3	5.e2	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d1	1.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d2	1.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d3	3.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d4	3.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d5	7.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
d6	7.e3	0.2	0.203	0.5	0.5004	50.	0.035						
DHcond	36.	-20.	40.	8.0	2.0	1000.	2800.						
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3

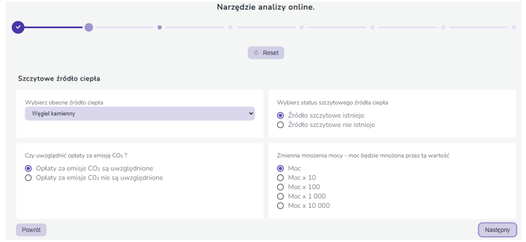
Entalpia gazów [kJ/kg]

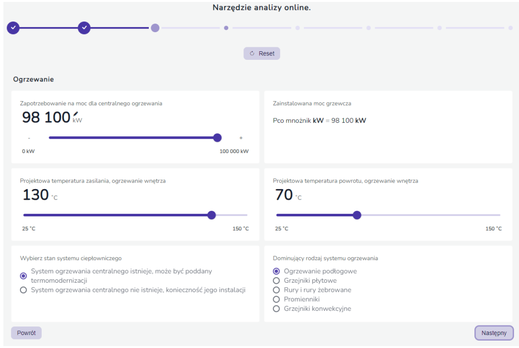
t[°C]	T, K	Powietrze	CO2	H2O	O2	N2	CO	SO2	H2			
0	273.15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
100	373.15	100.609	86.583	187.296	92.319	104.042	104.168	63.472	1435.235			
200	473.15	202.306	182.042	378.738	187.066	208.670	209.256	132.135	2884.287			
300	573.15	305.720	284.619	575.685	284.955	314.638	316.145	205.446	4333.338			
400	673.15	411.311	393.057	779.163	386.023	419.099	425.379	282.316	5790.344			
500	773.15	519.582	506.603	988.922	489.437	532.980	537.585	362.033	7255.724			
600	873.15	629.695	623.833	1205.380		595.782	645.605	651.466	443.382	8725.291		
700	973.15	742.320	744.832	1429.374		703.382	760.742	768.278	527.118	10211.605		
800	1073.15	856.619	868.342	1660.485		812.658	877.972	887.183	611.273	11714.666		
900	1173.15	973.431	993.946	1898.714		923.189	996.877	1008.181		697.102	13234.475	
1000	1273.15	1090.661		1122.481		2143.642		1034.977		1117.876	1130.436	782.932	14775.217
1100	1373.15	1209.985		1252.272		2394.850		1147.602		1239.711	1253.947	870.017	16336.894
1200	1473.15	1329.728		1383.737		2652.756		1261.064		1363.222	1379.132	956.684	17919.504
1300	1573.15	1451.564		1516.040		2915.688		1375.364		1487.989	1505.155	1043.351	19531.422
1400	1673.15	1573.818		1649.599		3184.061		1490.501		1613.593	1632.015	1130.018	21155.900
1500	1773.15	1696.910		1784.414		3457.459		1606.894		1740.453	1759.712	1223.383	22801.313
1600	1873.15	1820.839		1919.229		3735.044		1723.706		1867.731	1887.828	1316.748	24467.659
1700	1973.15	1945.187		2055.719		4017.653		1841.355		1995.010	2017.200	1410.113	26150.753
1800	2073.15	2070.373		2192.208		4303.193		1959.422		2123.545	2146.154	1503.478	27850.594
1900	2173.15	2196.395		2329.117		4591.664		2078.746		2252.917	2276.782	1596.843	29567.182
2000	2273.15	2321.999		2466.863		4892.276		2198.070		2382.289	2406.573	1668.858	31296.330
2100	2373.15	2449.697		2605.027		5179.490		2318.650		2512.917	2537.619	1740.873	33046.412
2200	2473.15	2576.138		2743.191		5477.172		2439.230		2642.708	2668.248	1812.888	34800.682
2300	2573.15	2703.835		2882.193		5777.784		2561.484		2773.336	2800.132	1884.903	36575.885
2400	2673.15	2832.789		3020.358		6080.490		2683.739		2904.802	2932.016	1956.918	38359.462
2500	2773.15	2960.068		3158.941		6385.707		2807.250		3035.430	3064.738	2169.600	40159.786

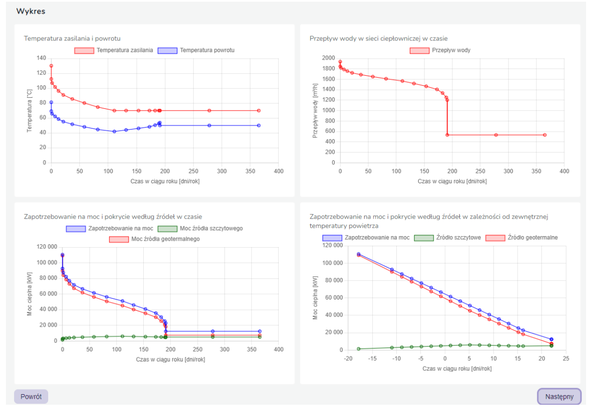
U4GEcalc

User4GeoEnergy calculator (interfejs online)









U4GEfm Opis metodyki (1/2)

- Celem prac jest opracowanie i przetestowanie na lokalizacjach testowych metodyki matematycznego modelowania poprawy efektywności wykorzystania energii geotermalnej w sieciach ciepłowniczych. Zakres modelowania objąć ma wszystkie elementy systemu, istotne dla oceny efektywności wykorzystania energii geotermalnej, od źródła energii po odbiorcę. Model wykorzystywać będzie następujące **moduły**:
- **moduł źródła energii**. Model źródła energii będzie ukierunkowany na wykorzystanie energii geotermalnej, uwzględniając również najpowszechniej wykorzystywane źródła wspomagania szczytowego (pompy ciepła i kotły szczytowe),
- **moduł systemu dystrybucji.** Uwzględni straty energii cieplnej na przesyle, uzależnione od konstrukcji rurociągu i warunków jego ułożenia,
- **moduł odbiorcy energii**, definiujący jego charakterystykę w zakresie parametrów niezbędnych dla opisu współpracy układu odbiorca energii – sieć ciepłownicza,
- wszystkie moduły uwzględniać będą zmienność czasową parametrów istotnych dla energetycznej pracy systemu. Ze szczególnym uwzględnieniem zapotrzebowania na energię w zakresie ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Dla opisu zmiennych w czasie warunków atmosferycznych **planuje się wykorzystać dane meteorologiczne pochodzące z tzw. typowego roku meteorologicznego**, z rozdzielczością jednej godziny, uwzględniając konkretną lokalizację instalacji,
- do modelowania efektów pracy układu źródło-odbiorca wykorzystany zostanie **model o parametrach skupionych**. W systemie wskazane będą pewne punkty charakterystyczne (węzły), w których określane będą istotne dla pracy systemu parametry. Dzięki znajomości wartości zmiennych istotnych dla pracy systemu, możliwe będzie opisanie warunków jego pracy. Wartość parametrów roboczych w węzłach będzie ulegać zmianom w czasie, wraz ze zmieniającymi się warunkami pogodowymi.

Opis opis metodyki (2/2)

- Zachowano pewien **logiczny ciąg działań**, **zmierzających do ilościowego opisu warunków pracy wybranych systemów geotermalnych**: od opracowania **modelu koncepcyjnego** systemu, przez opracowanie jego **modelu matematycznego**, ujmując jego **kalibrację i testowanie**, aż do możliwości **testowania efektów** wdrażania przedsięwzięć **modernizacyjnych**.

(1) **model koncepcyjny** systemu -► (2) **model matematyczny** -► (3) **kalibracja, testowanie** -► (4) **prognozowanie** zmian

- **Docelową grupą odbiorców są projektanci i operatorzy systemów ciepłowniczych**, zwłaszcza tych które korzystają z geotermii, jako źródła energii.
- Ocena efektów pracy systemu i podejmowanych działań modernizacyjnych, rozwojowych zmierza do wzrostu efektywności i ograniczenia wpływu na środowisko.
- **Wyniki mają zwrócić uwagę na istotność wymogów odbiorcy na koszty** (w tym koszty ekonomiczne i ekologiczne) zaspokojenia jego potrzeb.
- **Ostatecznym celem działań poprawa stanu środowiska naturalnego**. Wpływ na środowisko dotyczy zarówno poprawy stanu jakości powietrza atmosferycznego (ograniczenie emisji), jak i ochronę zasobów geotermalnych.

  Cel „**Ograniczenia negatywnych skutków działalności człowieka dla środowiska**”, przy utrzymaniu warunków komfortu.

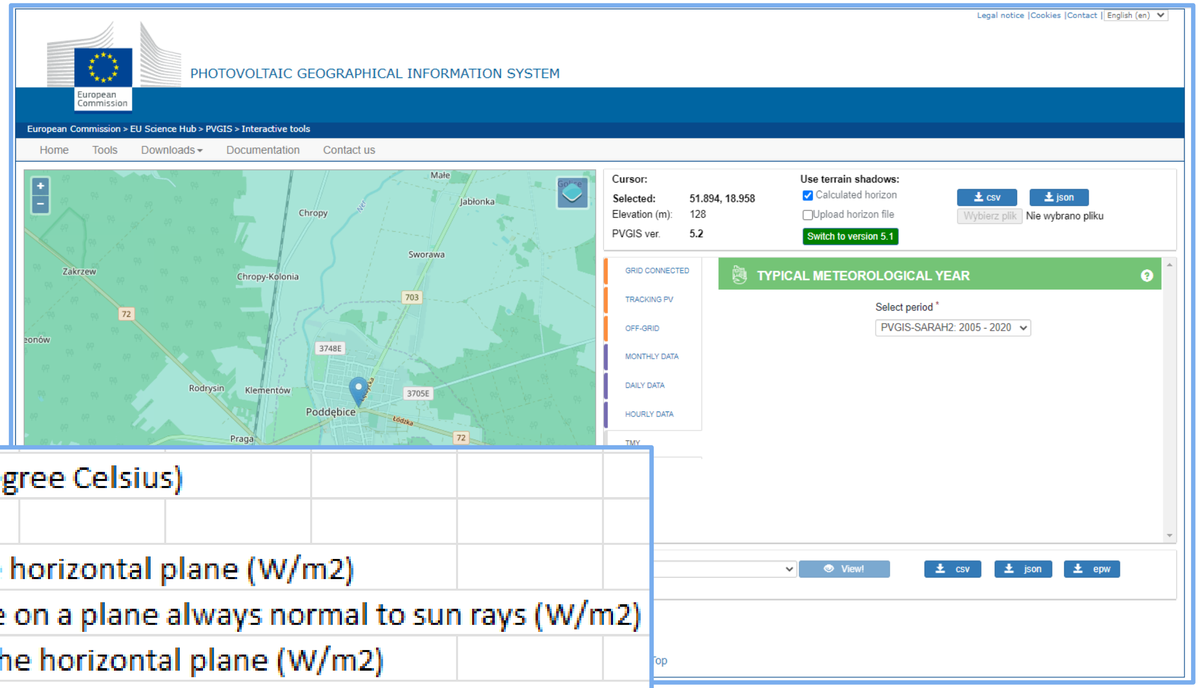
Warunki pogodowe / dane pogodowe (U4GE fm i calc)

Wykorzystywana jest baza danych i algorytm ich przetwarzania: „PHOTOVOLTAIC GEOGHRAPHICAL INFORMATION SYSTEM”
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY

- **Typowy Rok Meteorologiczny**

(**T**ypical **M**eteorological **Y**ear, **TMY**),

- Bazowanie na ogólnie dostępnych i darmowych danych TMY. TMY zawiera/ujmuje:
- Data (w ciągu roku) i czas (w ciągu doby),
- Temperatura powietrza na wysokości 2 m_{npt},
- Wilgotność względna powietrza,
- Całkowita gęstość strumienia promieniowania słonecznego,
- Gęstość strumienia bezpośredniego prom. słonecznego,
- Gęstość rozproszonego promieniowania słonecznego,
- Długofalowe promieniowanie podczerwone,
- Prędkość wiatru,
- Kierunek wiatru,
- Ciśnienie atmosferyczne,



T2m: 2-m air temperature (degree Celsius)
RH: relative humidity (%)
G(h): Global irradiance on the horizontal plane (W/m2)
Gb(n): Beam/direct irradiance on a plane always normal to sun rays (W/m2)
Gd(h): Diffuse irradiance on the horizontal plane (W/m2)
IR(h): Surface infrared (thermal) irradiance on a horizontal plane (W/m2)
WS10m: 10-m total wind speed (m/s)
WD10m: 10-m wind direction (0 = N, 90 = E) (degree)
SP: Surface (air) pressure (Pa)

Co to jest charakterystyka odbiorcy energii? (U4GE fm i calc)

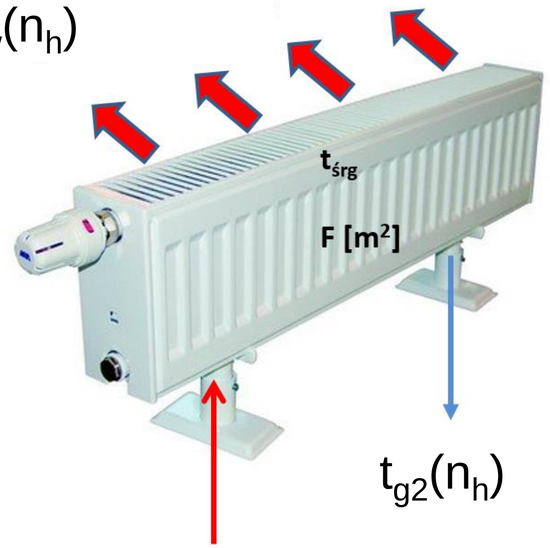
temperatura zewnętrzna (powietrza)

$t_{ot}(n_h)$

temperatura wewnętrzna

$t_w(n_h)$

$k = f[\varepsilon, w, (t_w - t_{śrg})]$

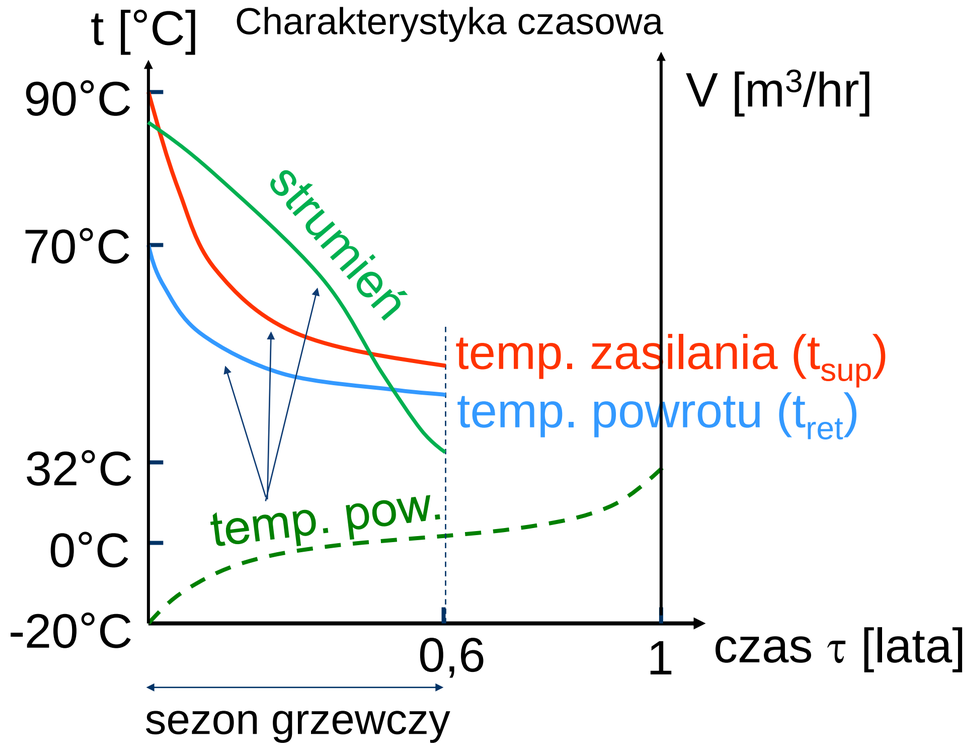


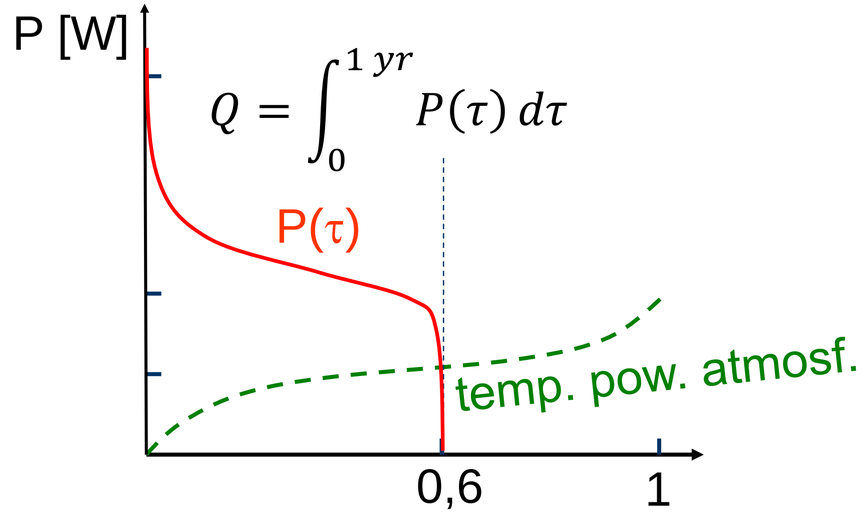
$$\begin{cases} P = k\ F\ (t_{śrg} - t_w) \\ P = V\ \rho\ c\ (t_{g1} - t_{g2}) \end{cases}$$

„siła napędowa” dla wymiany ciepła Δt

$$\Delta t_{śg} := \frac{(t_{g1} - t_w) - (t_{g2} - t_w)}{\ln\left(\frac{t_{g1} - t_w}{t_{g2} - t_w}\right)}$$

Charakterystyka odbiorcy energii





Strumień objętości czynnika roboczego:

$$V(n_h) = V_{dsg}\left(\frac{t_{in}(n_h) - t_a(n_h)}{t_{in_dsg} - t_{a_dsg}}\right)^f$$

- indeks **dsg** oznacza warunki obliczeniowe (design),
- $\mathbf{n_h}$ – czas, godzina w ciągu roku,

Definicja sezonu grzewczego (U4GE fm i calc)

Sezon grzewczy to czas w ciągu roku w którym pracuje instalacja grzewcza. W modelu matematycznym określany jest on na podstawie analizy danych pogodowych.

Założono, że głównym parametrem decydującym o rozpoczęciu lub zakończeniu ogrzewania obiektów jest temperatura powietrza (termometru suchego).

Definicja początku i końca sezonu grzewczego SG

Początek SG ► Jeżeli jesteśmy poza sezonem grzewczym, to sezon grzewczy rozpoczyna się jeżeli średnia dobowa temperatura powietrza t_{sd} jest przez określoną ilość dni $\Delta\tau$ jest mniejsza lub równa pewnej określonej wartości granicznej t_{sg}.
W czasie trwania sezonu grzewczego, dopuszcza się wyłączenie ogrzewania (brak zapotrzebowania na moc grzewczą), jeżeli chwilowa temperatura powietrza przekroczy pewną wartość graniczną t_{co_stop}.

Koniec SG ► Jeżeli sezon grzewczy trwa, a przez określoną ilość dni $\Delta\tau$, temperatura średnia dobowa powietrza atmosferycznego t_{sd} jest wyższa od określonej wartości t_{sg}, to oznacza to koniec sezonu grzewczego.

◄ Sezon grzewczy, zależnie od danych pogodowych dla danego typu obiektów, może rozpoczynać się i kończyć wielokrotnie.

◄ Wartości t_{sg} i $\Delta\tau$ zależą od typu budownictwa (budynków), a dokładnie od ich ochrony cieplnej (izolacyjności przegród) i pojemności cieplnej budynków. Model posłuży się pewnymi wartościami uogólnionymi dla ogrzewanych obiektów.
Wartość t_{co_stop} zależy, dodatkowo (ponad powyżej wymienione parametry istotne dla t_{sg} i $\Delta\tau$) od mocy wewnętrznych źródeł ciepła.

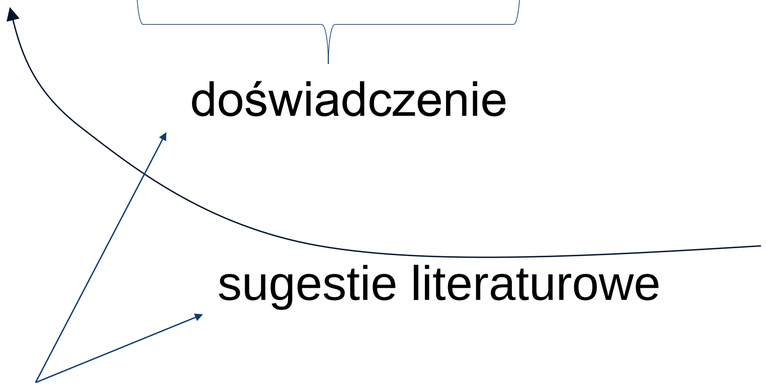
Definicja sezonu grzewczego

◄ Wartości typowe parametrów definiujących początek i koniec sezonu grzewczego (można je zmieniać dowolnie – moduł jest kalibrowalny, o ile istnieją dane archiwalne):

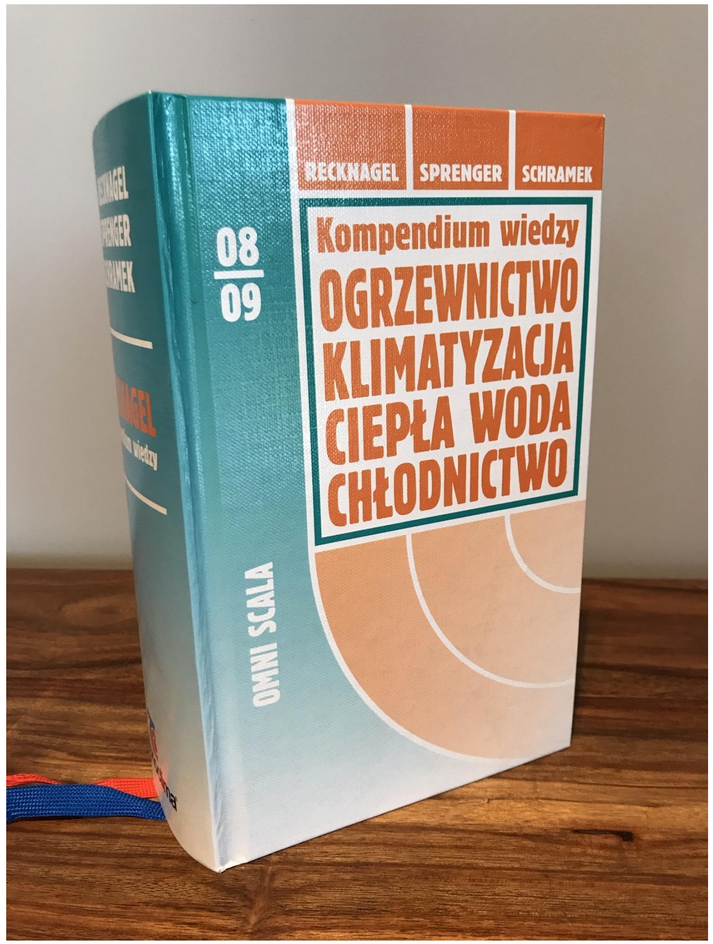
t_{sg} = 8-12°C, przyjmowano 10°C

$\Delta\tau$ = 2-5 dni, przyjmowano 3 dni

t_{co_stop} = 12-18°C, przyjmowano 16°C



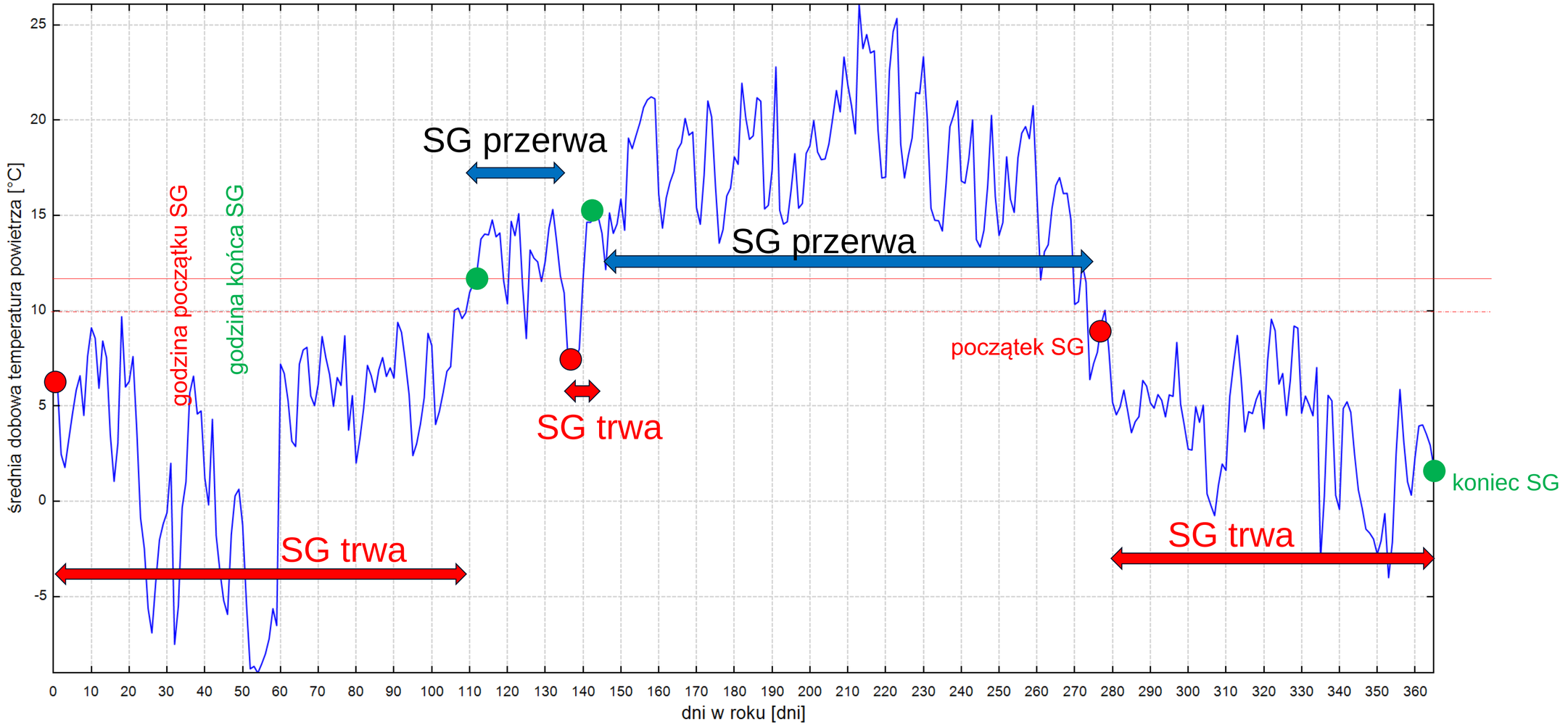
Korekta rozbieżności możliwa, jeżeli posiada się odpowiedniej jakości i w odpowiedniej ilości dane pomiarowe.
Model jest uniwersalny, wartości można zmieniać dowolnie.



$$SG := FSezonGrzewczy(tsd; 10; 3; 1)$$

Definicja sezonu grzewczego, przykład

$$SG = \begin{bmatrix} 1 & 2688 \\ 3312 & 3408 \\ 6624 & 8760 \end{bmatrix}$$

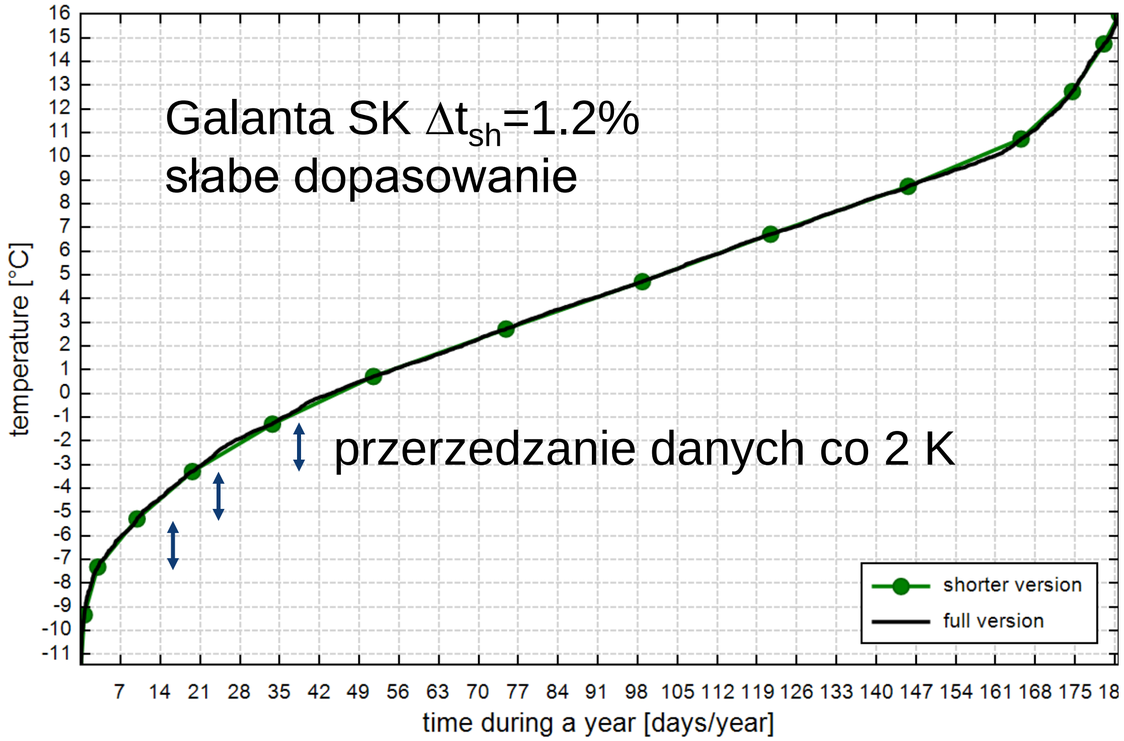


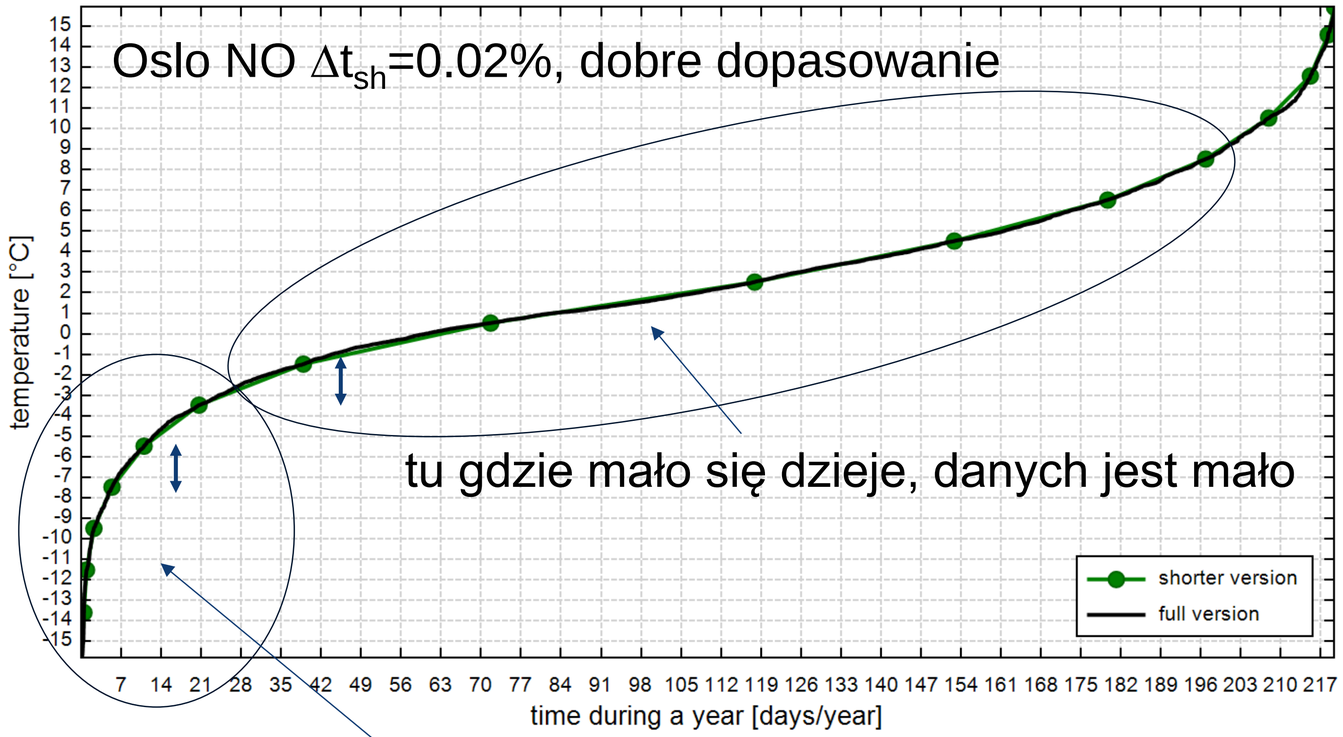
tsd

Definicja sezonu grzewczego (U4GEcalc, U4GEfm pracuje na danych oryginalnych)

Dla oszczędzenia czasu, wybrane obliczenia (U4GEcalc) wykorzystywały zastępczy, zredukowany sezon grzewczy

$t(\tau)_{full}$ -► $t(\tau)_{short}$ ◄- cel, skrócenie czasu obliczeń





Błąd przybliżenia:

$$\Delta t_{sh} = \frac{\left| \int_0^{nf} t_{full}(\tau) - \int_0^{ns} t_{short}(\tau) \right|}{\int_0^{nf} t_{full}(\tau)} \cdot 100\%$$

Moc grzewcza - ogrzewanie

Ocena zapotrzebowania na moc chwilową dla ogrzewania (co)

moc chwilowa w godzinie n_h

Potrzebujemy tego co jest wynikiem modułu pogodowego $t_a(n_h)$ – zmienność temperatury powietrza w czasie roku

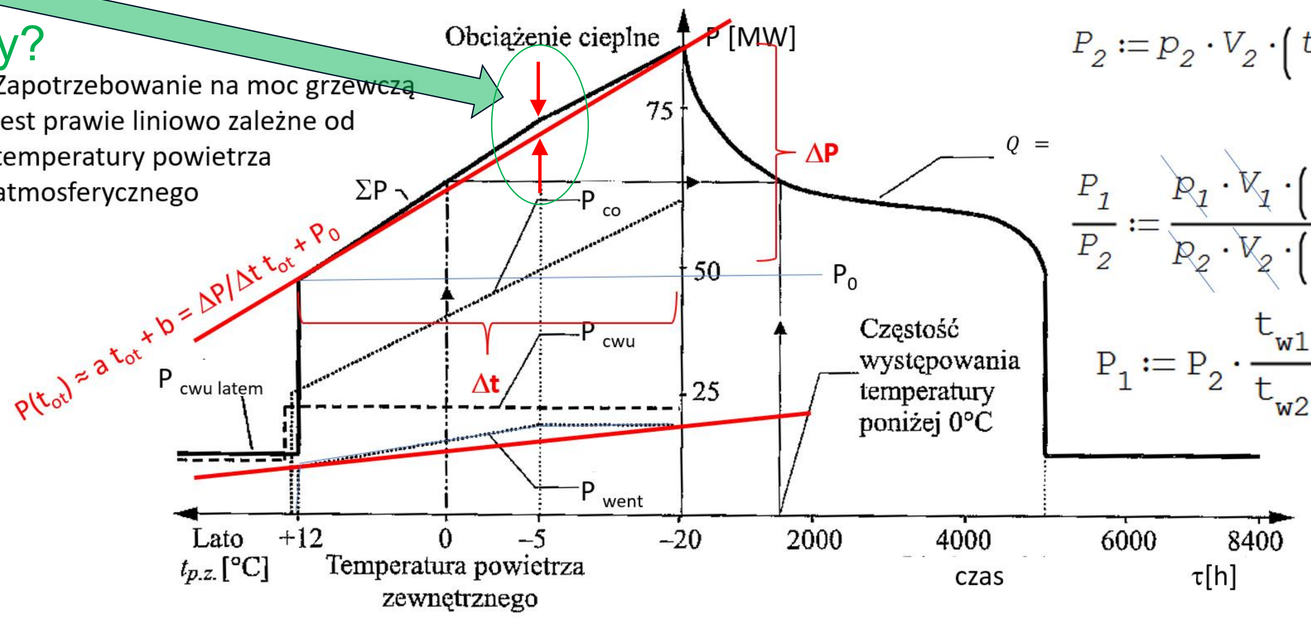
$$p_{sh}(n_h) = \frac{P_{sh}(n_h)}{P_{sh_dsg}} \approx \frac{t_{in}(n_h) - t_a(n_h)}{t_{in_dsg} - t_{a_dsg}}$$

chwilowa wartość współczynnika wykorzystania mocy maksymalnej co, godzinie n_h w roku

moc maksymalna - projektowa

na jaki błąd się godzimy i kiedy?

Zapotrzebowanie na moc grzewczą jest prawie liniowo zależne od temperatury powietrza atmosferycznego



$$P_1 := p_1 \cdot V_1 \cdot \left(t_{w1} - t_{ot1}\right)$$

$$P_2 := p_2 \cdot V_2 \cdot \left(t_{w2} - t_{ot2}\right)$$

$$Q =$$

$$\frac{P_1}{P_2} := \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot \left(t_{w1} - t_{ot1}\right)}{p_2 \cdot V_2 \cdot \left(t_{w2} - t_{ot2}\right)}$$

$$P_1 := P_2 \cdot \frac{t_{w1} - t_{ot1}}{t_{w2} - t_{ot2}}$$

Moc grzewcza chwilowa, w godzinie n_h

$$P_{sh}(n_h) = p_{sh}(n_h)\, P_{sh_dsg}$$

Energia na co

$$Q_{sh} = \int_0^{1\ yr} P_{sh}(\tau)\, d\tau$$

Odbiorca energii C.O., implementacja w modelu

Wykładnik potęgowy **f** (0 ≤ f ≤ 1) uwzględniający sposób sterowania mocą dostarczoną:
f=0 – sterowanie jakościowe
f=1/3 – sterowanie pełne, typowa wartość

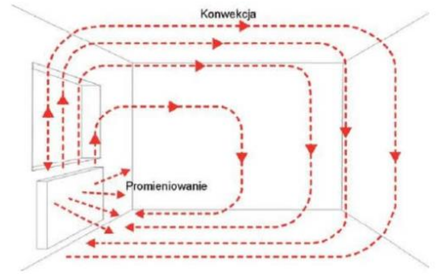
$$\begin{cases} \frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)} = \frac{m_{dsg}}{m(n_h)}\frac{t_{s_dsg}-t_{r_dsg}}{t_s(n_h)-t_r(n_h)} \\ \frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)} = \left(\frac{\frac{t_{s_dsg}-t_{r_dsg}}{ln\left(\frac{t_{s_dsg}-t_{in_dsg}}{t_{r_dsg}-t_{in_dsg}}\right)}}{\frac{t_s(n_h)-t_r(n_h)}{ln\left(\frac{t_s(n_h)-t_{in}(n_h)}{t_r(n_h)-t_{in}(n_h)}\right)}}\right)^b \end{cases}$$

Temperatury zasilania i powrotu:

$$t_r(n_h) = t_{in}(n_h) - \frac{(t_{s_dsg}-t_{r_dsg})\left(\frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}\right)^{f-1}}{1-e^{ln\left(\frac{t_{s_dsg}-t_{in_dsg}}{t_{r_dsg}-t_{in_dsg}}\right)\left(\frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}\right)^{\frac{1}{b}+f-1}}}$$

$$t_s(n_h) = t_r(n_h) + (t_{s_dsg} - t_{r_dsg})\left(\frac{t_{in_dsg} - t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h) - t_a(n_h)}\right)^{f-1}$$

Wykładnik potęgowy **b** przyjmuje następujące, charakterystyczne wartości (Recknagel i inni 2008):
~ 1.1 dla ogrzewania podłogowego,
~ 1.2-1.3 dla grzejników płytowych,
~ 1.25 dla rur i rur ożebrowanych,
~ 1.3 dla radiatorów,
~ 1.25-1.45 dla grzejników konwekcyjnych.



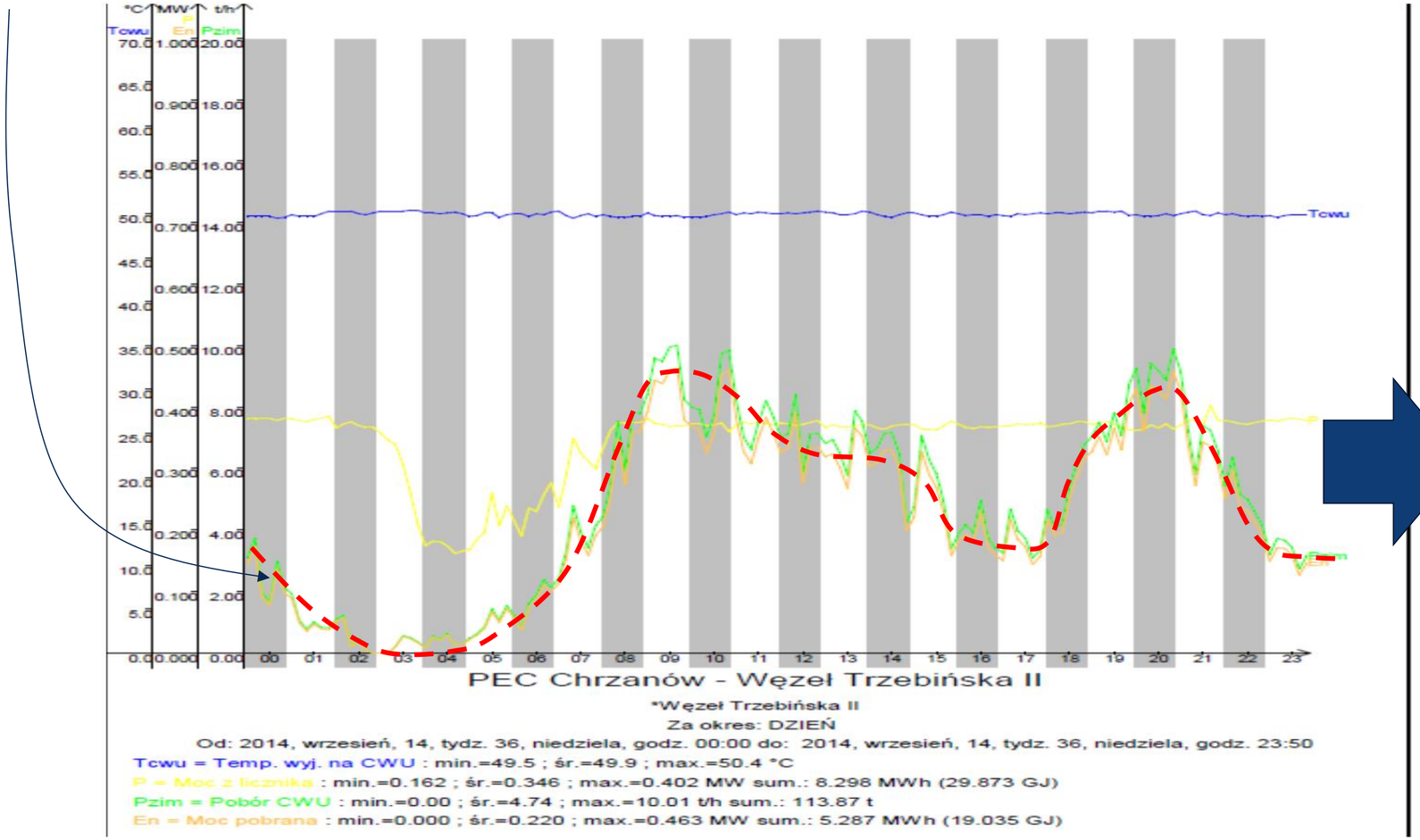
Grzejnik oddaje ciepło przez konwekcję i promieniowanie

Strumień objętości czynnika roboczego:

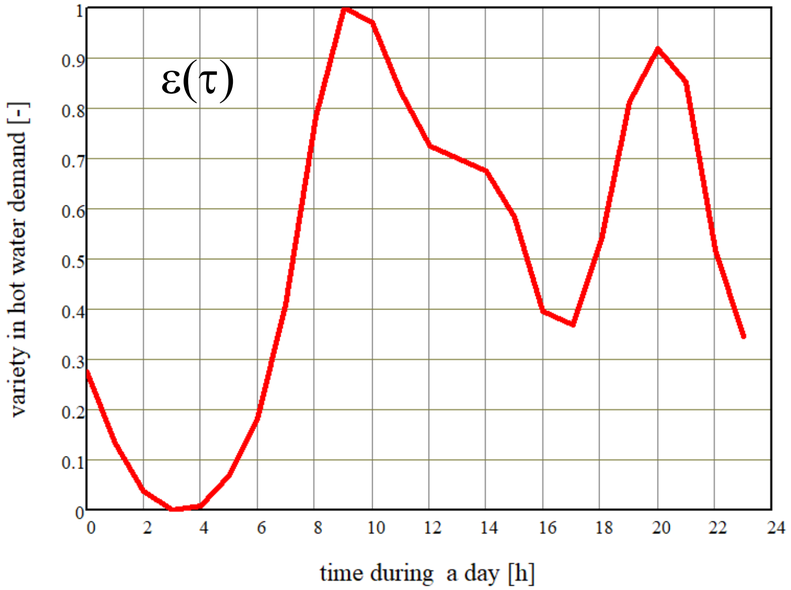
$$V(n_h) = V_{dsg}\left(\frac{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}\right)^f$$

Instalacja ciepłej wody użytkowej (U4GEfm, U4GEcalc zakłada stałe zużycie z mocą średnią - roczną)

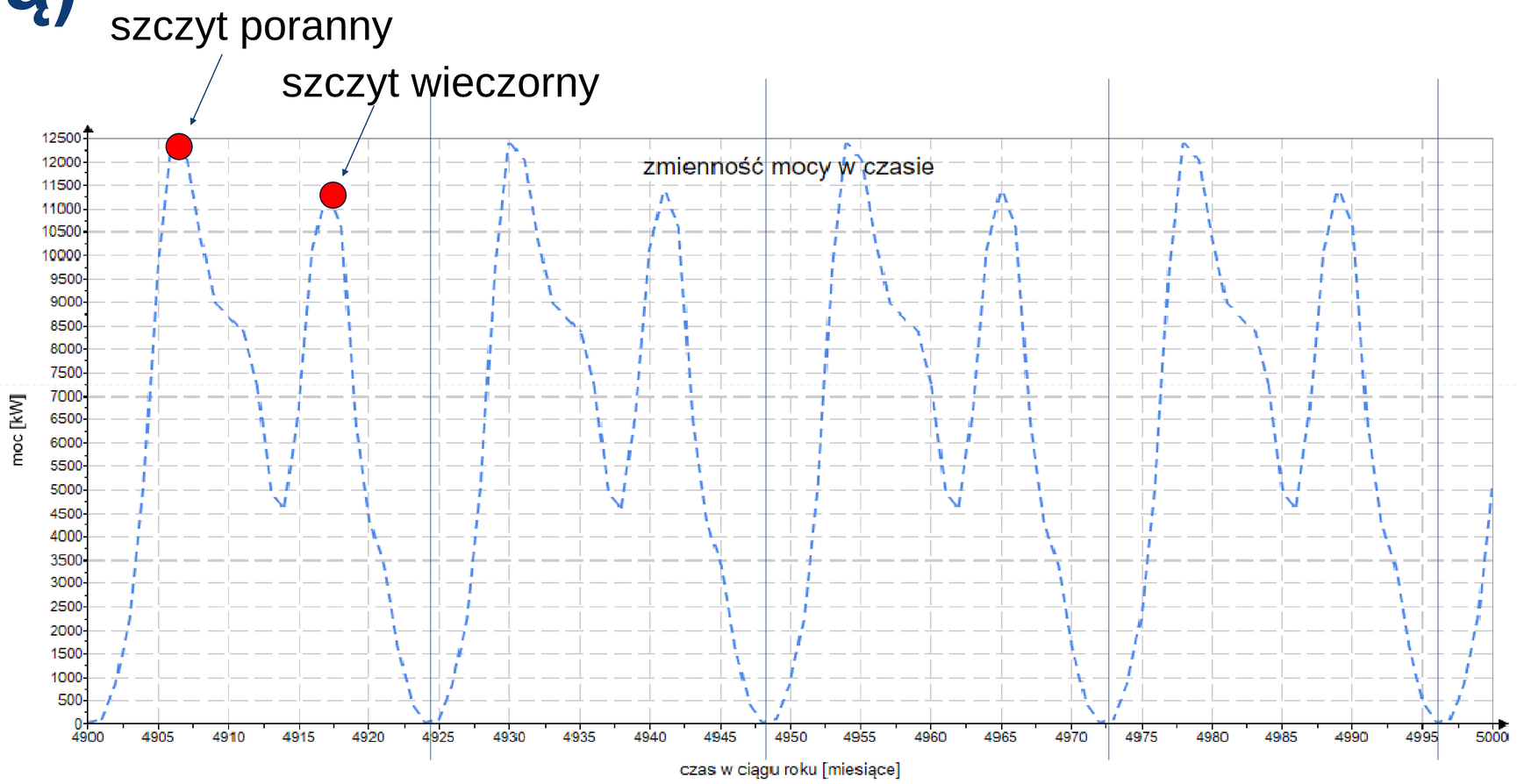
Uwzględniono dobową zmienność na c.w.u. oraz parametry projektowe, temp. zasilania (>55°C) i powrotu



Założony scenariusz rozbioru cwu



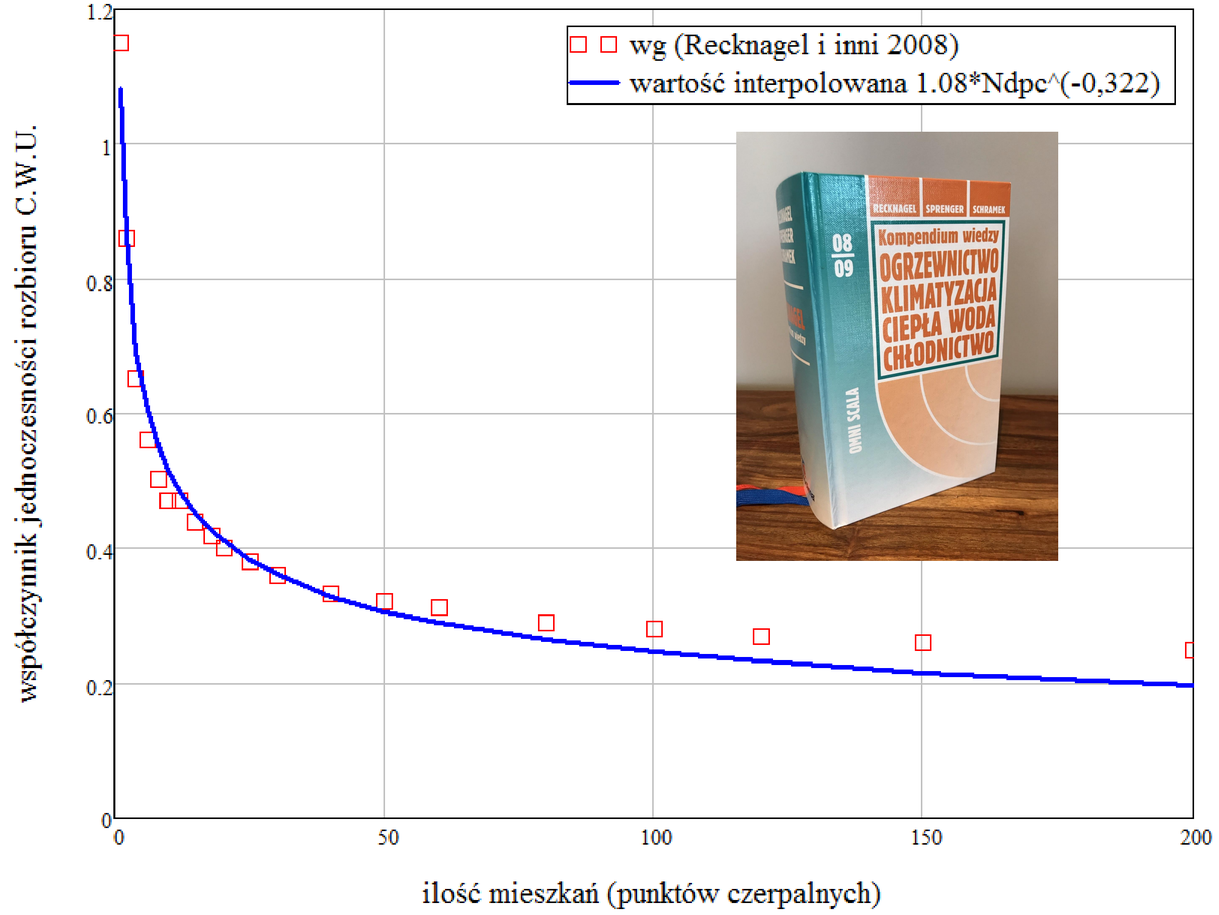
Instalacja ciepłej wody użytkowej (U4GEfm, U4GEcalc zakłada stałe zużycie z mocą średnią - roczną)



Przykład Konina – 4 wybrane dni, zapotrzebowanie na cwu

Instalacja ciepłej wody użytkowej

Obliczenia uwzględniają współczynnik niejednoczesności rozbiory cwu ϕ, zależny od ilości dużych punktów czerpalnych n_{phw}



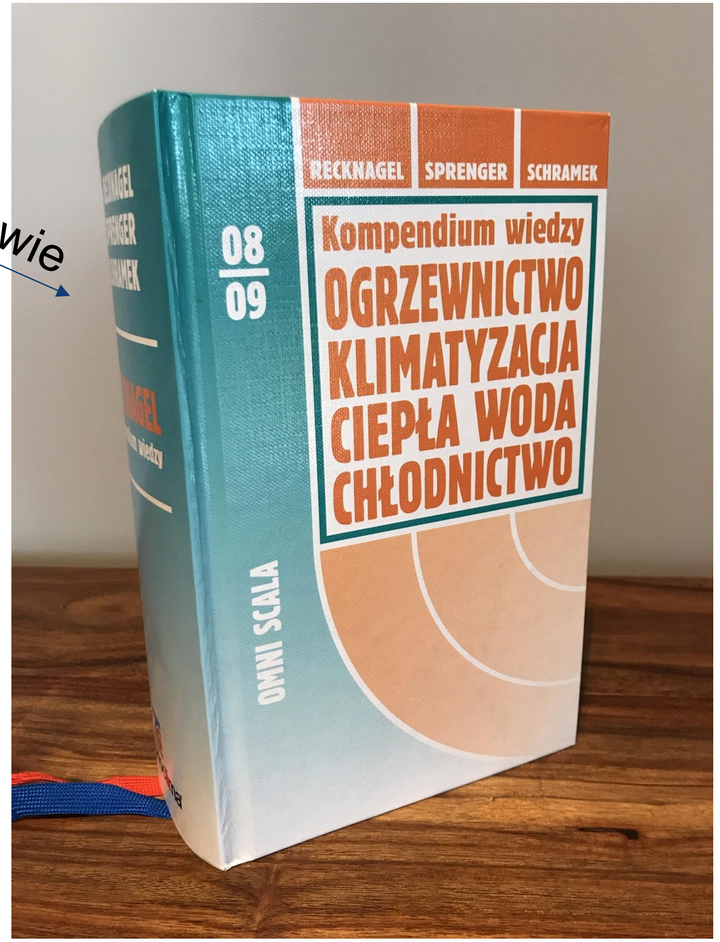
$$\varphi \approx 1{,}08\, N_{dpc}^{\,-0{,}322}$$

Instalacja ciepłej wody użytkowej

Obliczenia uwzględniają współczynnik niejednoczesności rozbiory cwu ϕ, zależny od ilości dużych punktów czerpalnych n_{phw}

$$\varphi = 1.08\, n_{phw}{}^{-0.322}$$

na podstawie



W dużych systemach można założyć ok. 2,7 os/dpc

moc chwilowa i energia dla cwu

$$P_{hw}(\tau) = \varepsilon(\tau)\, P_{hw_dsg}$$

$$Q_{hw} = \int_0^{1\,yr} P_{hw}(\tau) d\tau$$

moc cwu na osobę [W/os]

zużycie dzienne cwu na osobę [L/(dzień os)]

$$P_{hw_dsg} = \varphi \frac{v_{hw}\, c\, \rho\, (t_{hw} - t_{cw})}{\Delta\tau_{hw}}$$

czas podgrzewu cwu, zależny od systemu
[s/dzień]
- objętościowy ~1 godzina/dzień,
- przepływowy ~12 min/dzień,
- duże grupy odbiorców, można założyć ok. 30 min/dzień lub dopasować do danych archiwalnych.

Sterowanie mocą dostarczoną

Strumień wody sieciowej

$$V(n_h) = V_{dsg}\left(\frac{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}\right)^f$$

f = 0 sterowanie jakościowe
0 < f < 1 – sterowanie pełne, zazwyczaj f = ~1/3

temperatura powrotu i zasilania

$$t_r(n_h) = t_{in}(n_h) - \frac{(t_{s_dsg}-t_{r_dsg})\left(\frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}\right)^{f-1}}{1-e^{ln\left(\frac{t_{s_dsg}-t_{in_dsg}}{t_{r_dsg}-t_{in_dsg}}\right)\left(\frac{t_{in_dsg}-t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h)-t_a(n_h)}\right)^{\frac{1}{b}+f-1}}}$$

$$t_s(n_h) = t_r(n_h) + \left(t_{s_dsg} - t_{r_dsg}\right)\left(\frac{t_{in_dsg} - t_{a_dsg}}{t_{in}(n_h) - t_a(n_h)}\right)^{f-1}$$

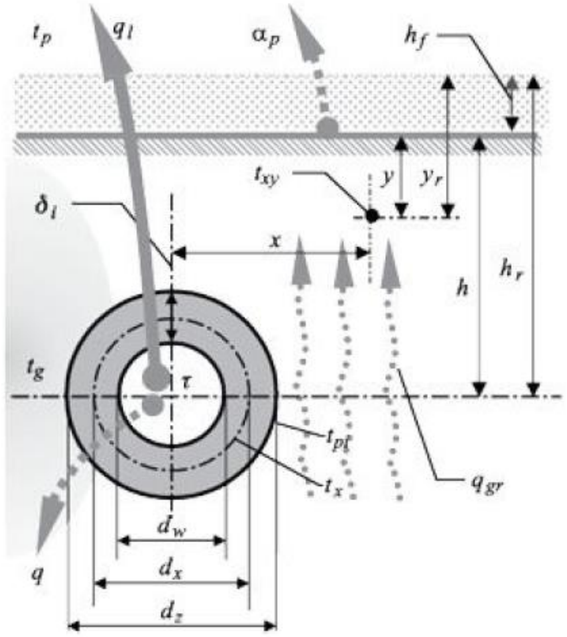
b wykładnik charakteryzujący dominujący typ instalacji grzewczej (b=1.1 ogrzewanie podłogowe, 1.2<b<1.3 – grzejniki płytowe, b=1.25 – rury grzejne, b=1.3 – grzejniki radiacyjne, 1.25<b<1.45 – konwektory).

Sieci przesyłowe, zaimplementowane w modelu

rodzaje sieci (tylko U4GEfm)

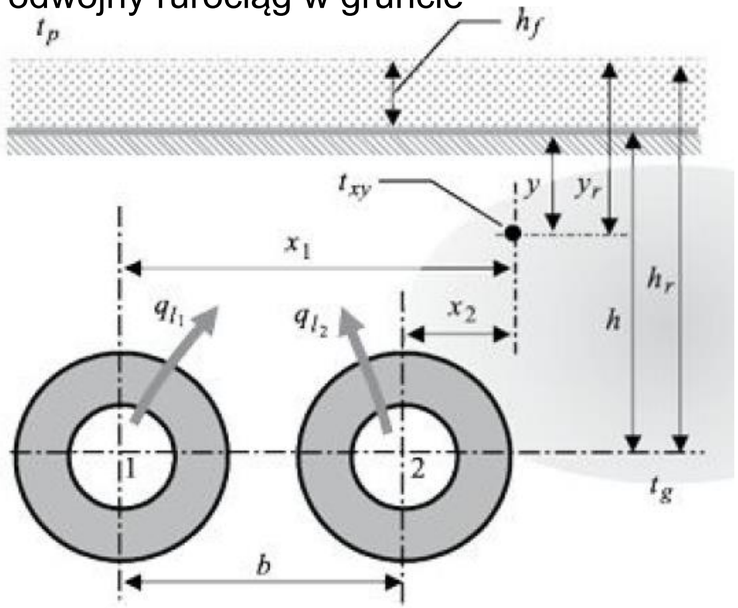
Dla każdego rodzaju rurociągów określane są straty na przesyle, głównie ciepła – na tym skupia się model

Pojedyncza rura (może być w gruncie lub na powietrzu)

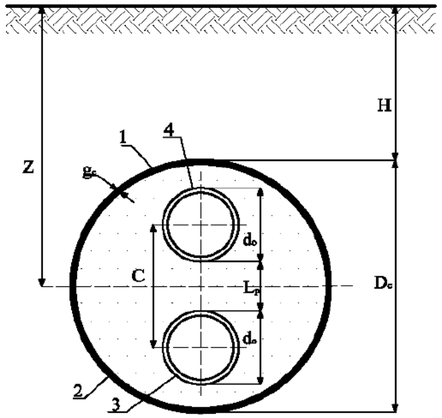


Szkarowski A. Ciepłownictwo. PWN. Warszawa, 2019

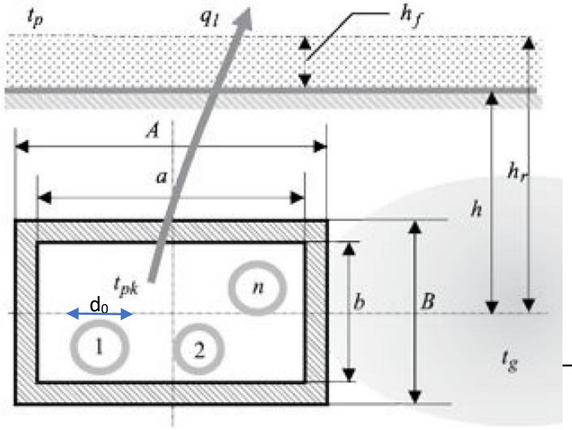
Podwójny rurociąg w gruncie



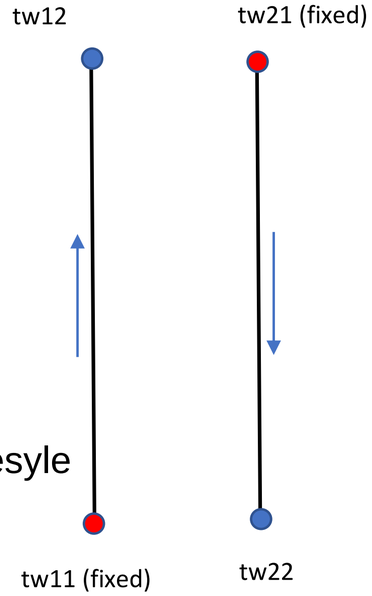
Rurociąg typu TWIN



Sieć kanałowa

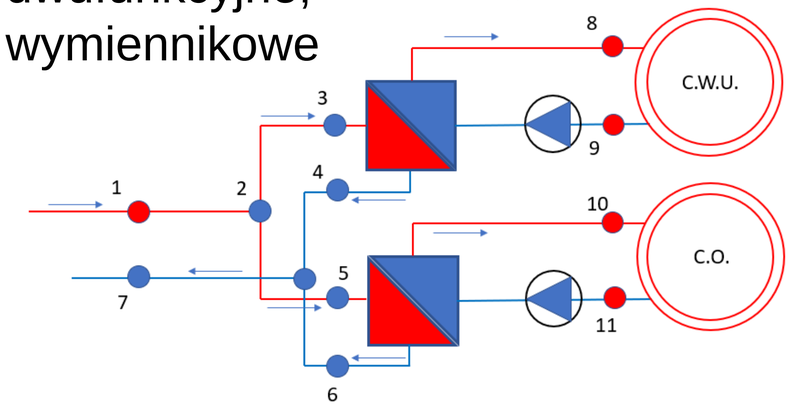


Warunki brzegowe dla strat na przesyle



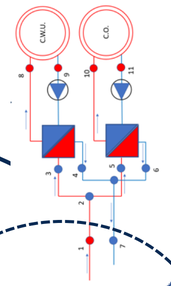
Model sieci ciepłowniczej
(tylko U4GEfm)

Węzły przyłączeniowe, pośrednie, równoległe, dwufunkcyjne, wymiennikowe



warunek brzegowy - węzeł w którym ustalono: t [°C], V [m3/s], p [Pa], TDS [g/L]

węzeł obliczeniowy, obliczamy : t [°C], V [m3/s], p [Pa], TDS [g/L]



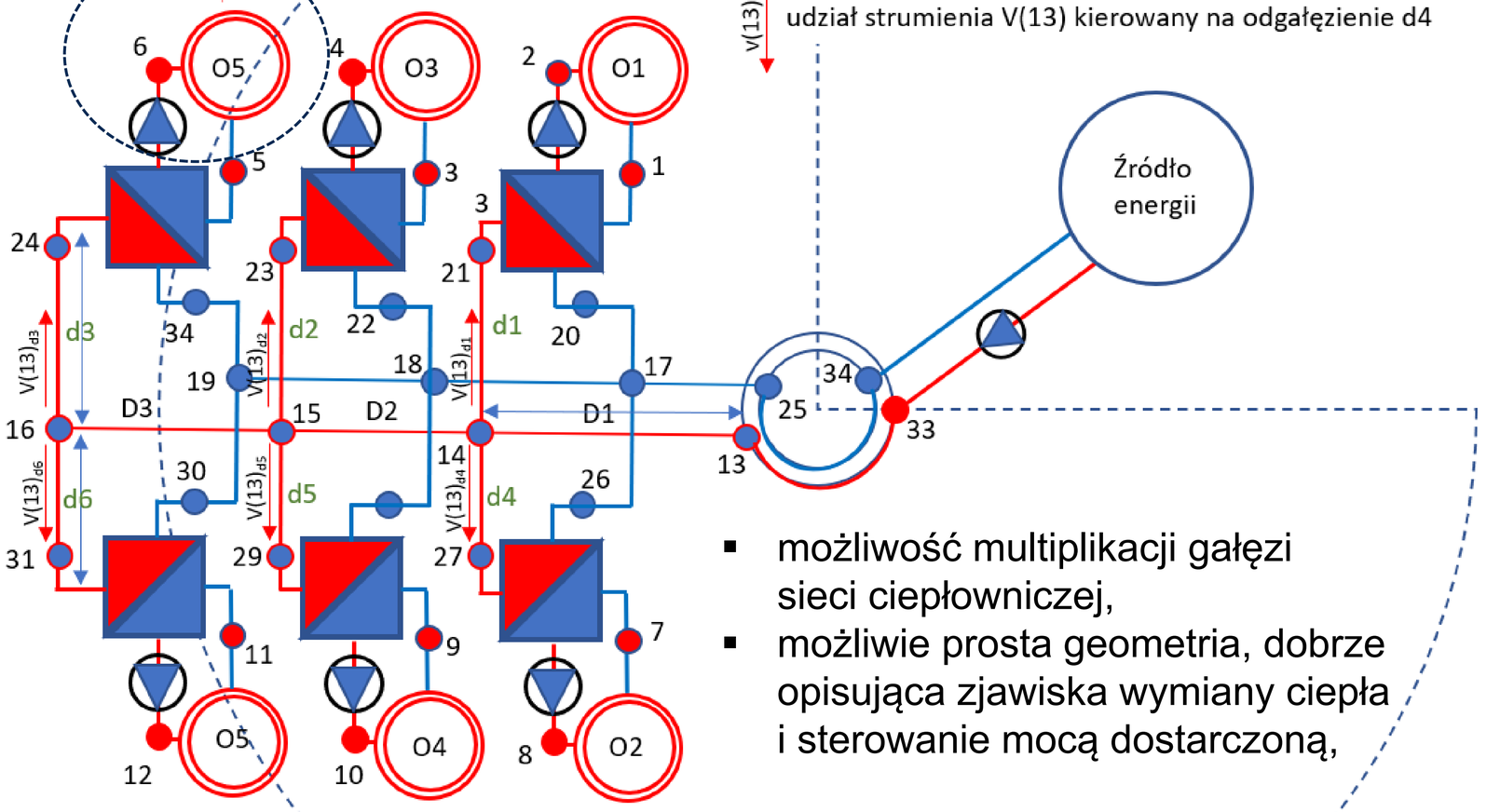
Jedna z gałęzi sieci

Modelujemy wycinek koła (kąt ϕ) lub całe koło (360°)

węzły brzegowe, ustalające: t [°C], V [m3/s], p [Pa], TDS [g/L]

węzły swobodne, obliczane: t [°C], V [m3/s], p [Pa], TDS [g/L]

$V(13)_{d4}$ udział strumienia V(13) kierowany na odgałęzienie d4



- możliwość multiplikacji gałęzi sieci ciepłowniczej,
- możliwie prosta geometria, dobrze opisująca zjawiska wymiany ciepła i sterowanie mocą dostarczoną,

Założenie:
Celem nie jest geometryczne odwzorowanie sieci ale takie uproszczenie geometrii, które pozwoli oddać charakter zjawisk fizycznych – skupiamy się na stratach energii cieplnej na przesyle.

Przykład definicji odbiorcy i sieci przesyłowej

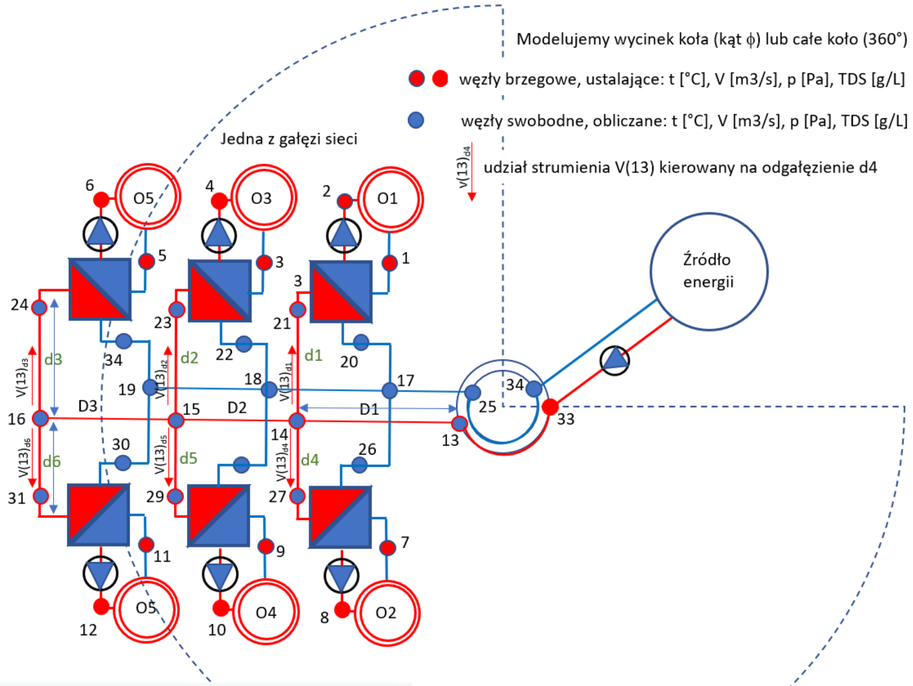
	Power [W]	tsup [°C]	tret [°C]			b [-]	f [-]		Power [W]	tsup [°C]	tret [°C]		
0---*----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8----*----9----*----0----*----1----*----2----*----3													
O1	4.0e6	75.0	55.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.25e6	60.0	40.0		
O2	0.0e6	80.0	60.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.e6	65.0	35.0		
O3	5.0e6	75.0	55.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.2e6	60.0	40.0		
O4	0.0e6	80.0	60.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.e6	65.0	35.0		
O5	0.0e6	80.0	60.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.e6	65.0	35.0		
O6	0.0e6	80.0	60.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	0.e6	65.0	35.0		
0---*----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8----*----9----*----0----*----1----*----2----*----3													
DHchar	11.e6	80.0	55.0	20.0	-20.0	1.30	0.33	12.0	1.0e6	65.0	35.0	0.5	
0---*----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8----*----9----*----0----*----1----*----2----*----3													
GEOM	180.	1.											
D1	2.e2	0.250	0.2503	0.4	0.4004	50.	0.045	2.0	1.5	2.			
D2	2.e2	0.250	0.2503	0.4	0.4004	50.	0.045	2.0	1.5	2.			
D3	0.e0	0.250	0.2503	0.4	0.4004	50.	0.045	2.0	1.5	2.			
d1	6.0e3	0.250	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.462		
d2	7.0e3	0.250	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.538		
d3	0.1e0	0.2	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.		
d4	0.1e0	0.2	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.		
d5	0.1e0	0.2	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.		
d6	0.1e0	0.2	0.203	0.35	0.3504	50.	0.045	2.0	1.5	2.	0.		
DHcond	36.	-20.	40.	8.0	2.0	1000.	2800.						
0---*----1----*----2----*----3----*----4----*----5----*----6----*----7----*----8----*----9----*----0----*----1----*----2----*----3													
---													

lenght [m]

DN [m]

Priorytetem zmian jest dotrzymanie warunków komfortu cieplnego u użytkowników.

Temperatura na końcówkach sieci ciepłowniczej jest kontrolowana, jeżeli określone parametry nie są dotrzymane model informuje o tym użytkownika.



"Sprawdzenie, czy nie doszło do niedotrzymania temp. u odbiorców, jeżeli jest 0 to ok."

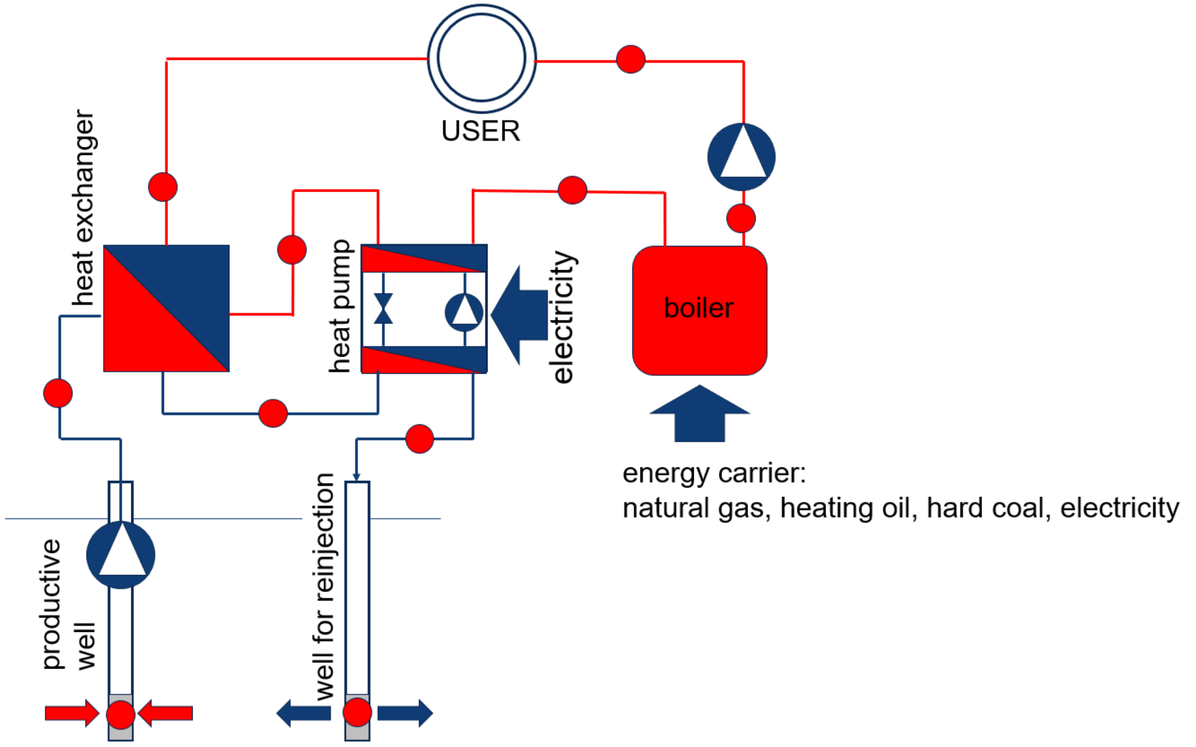
$$FsprawdzBrakTemp\left(Z_1, 0.\right) = 0$$

Moduł źródła energii (U4GEfm rozbudowany, U4GEcalc prosty)

► produkcyjny otwór geotermalny

Uwzględniono następujące parametry:

- głębokość,
- typ zarurowania,
- głębokość posadowienia wirnika zatapianej pompy eksploatacyjnej,
- poziom lustra wody,
- straty ciepła na wypływie,
- mineralizację płynu geotermalnego i jej wpływ na wymianę ciepła,



► wymienniki ciepła,

► kotły na paliwo stałe,

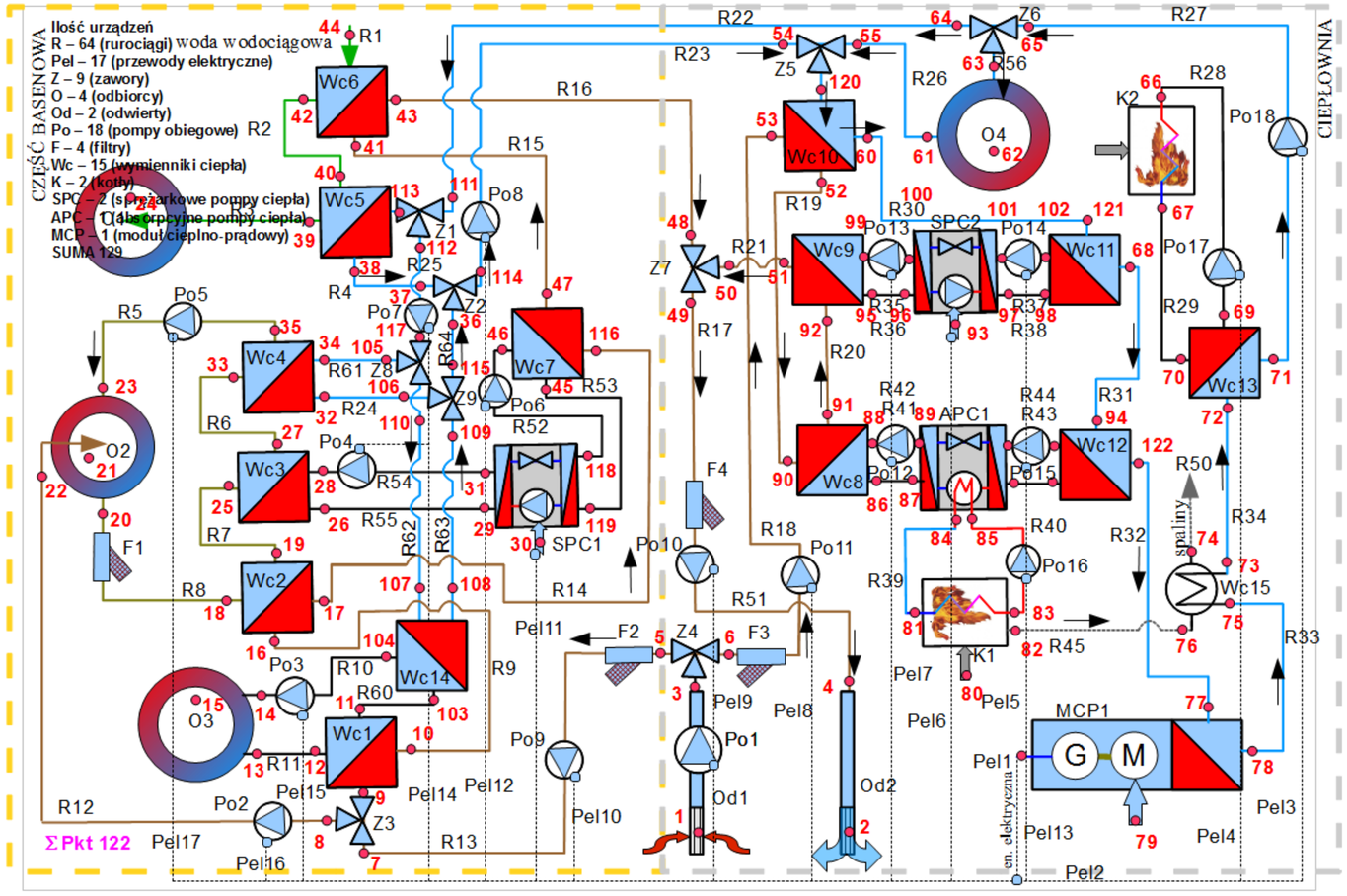
► kotły na gaz ziemny kondensacyjne i niekondensacyjne,

► kotły na olej opałowy, niekondensacyjne,

► sprężarkowe pompy ciepła,

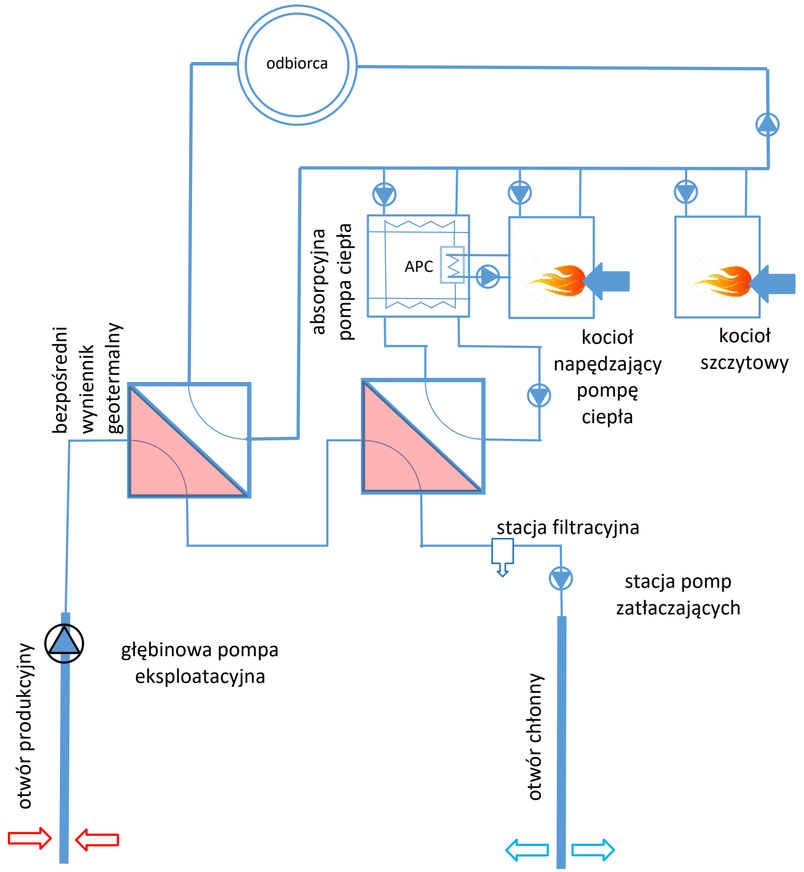
► absorpcyjne pompy ciepła napędzane wysokotemperaturowym kotłem gazowym z ekonomizerem.

Schemat ogólny źródła energii i pracy systemu



Przykład bardziej skomplikowanego systemu źródło-odbiorca modelowany metodą parametrów skupionych

Schemat ogólny źródła zawsze może być adaptowany do konkretnego przypadku, oddając możliwie precyzyjnie sposób pracy źródła.



Otwór produkcyjny (tylko U4GEfm)

Otwór dzielony jest na strefy, po głębokości.

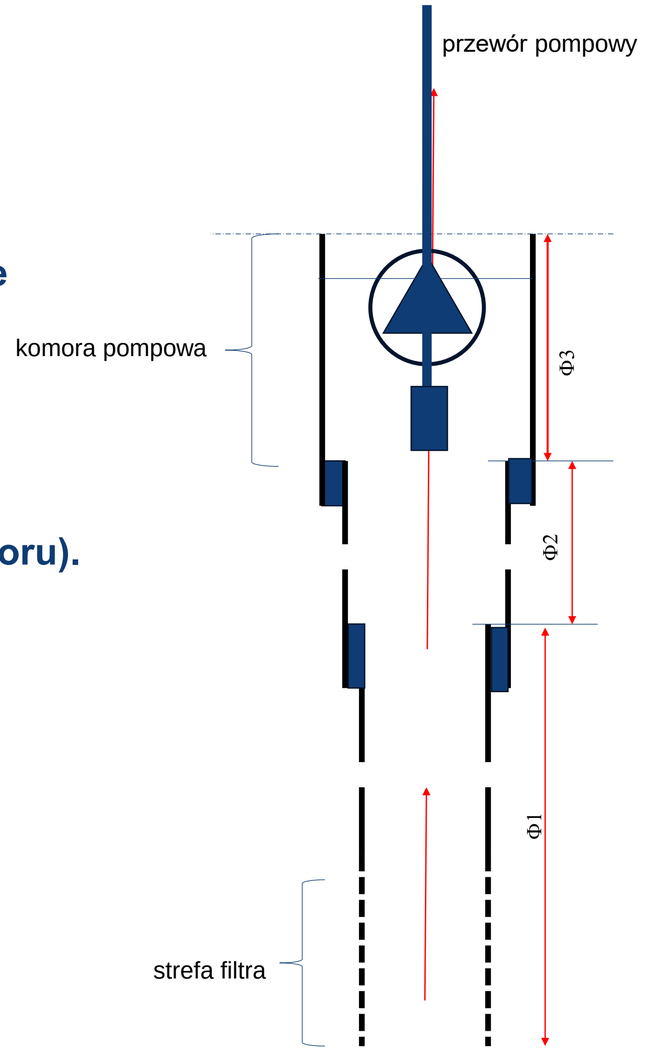
Straty mocy dla każdej strefy liczone są oddzielnie, każda strefa może mieć inne stałe fizyczne skał otoczenia i inną temperaturę naturalną.

Określana jest temperatura płynu na głowicy po określonym czasie.

Nie uwzględnia się nieustalonej wymiany ciepła (brak historii termicznej górotworu).

Uwzględnia się wpływ mineralizacji płynu na stratę temperatury.

Zakłada się przepływ jednofazowy – tylko ciecz.



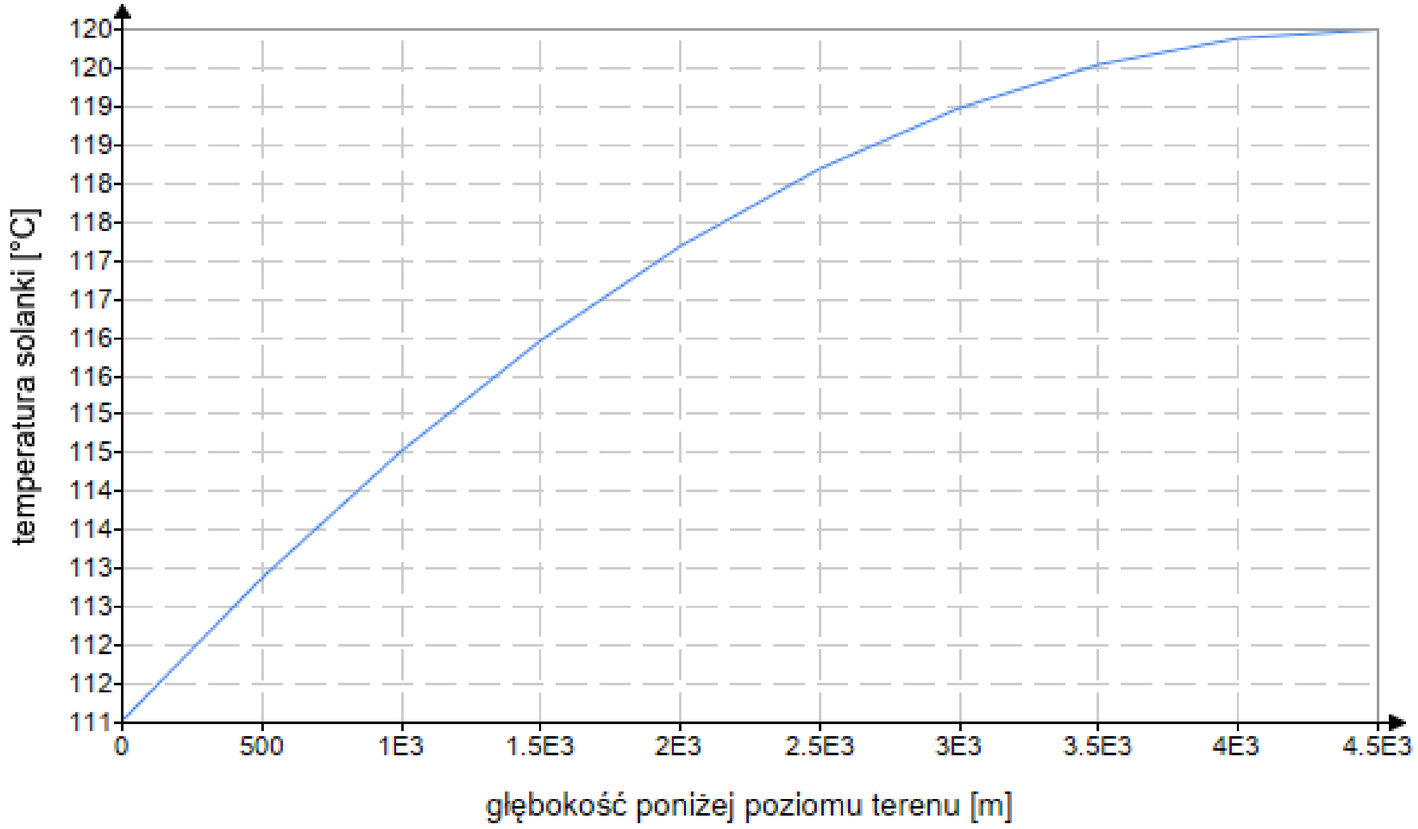
(Carslaw & Jaeger, 1948):

$$q_l = 4\,\lambda_r\,\Pi\,(t_w - t_\infty)\left[\ln\left(\frac{4a_r\tau}{r_w^2} - 2\gamma\right)\right]^{-1} \qquad \frac{4a_r\tau}{r_w^2} >> 1$$

$$t_{głowicowa} = t_{złożowa} - \frac{q\ H}{V\ c\ \phi} \quad \Rightarrow \quad t_{głowicowa} \rightarrow t_{złożowa}\ jeżeli\ \frac{q\ H}{V\ c\ \phi} \rightarrow 0\ K\ (V \rightarrow \infty)$$

Otwór produkcyjny, przykład

```
Kolumny: (1) i (2) głębokość interwału | (3) temp. na głębokości (1) | (4) temp. na głębokości (2). Podanie temp. mniejszej niż -1000°C
oznacza, że nie jest ona zadana - będzie interpolowana; | (6,7,8) gęstość [kg/m3], ciepło wł. [J/(kg K)], wsp. przewodzenia [W/(m K)]
Możesz uzupełnić temperatury wybiórczo, musisz podać conejmniej 2 wartości. Reszta zostanie uzupełniona zgodnie z gradientem. Błędne wpisanie
wartości powoduje przyjęcie wartości dla większej głębokości za prawdziwą.
1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8---*---9
0.      500.    8.0     -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
500.    1000.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
1000.   1500.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
1500.   2000.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
2000.   2500.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
2500.   3000.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
3000.   3500.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
3500.   4000.   -1.e6   -1.e6   0.244   2600.   1100.   3.5
4000.   4500.   -1.e6   120.0   0.244   2600.   1100.   3.5
```

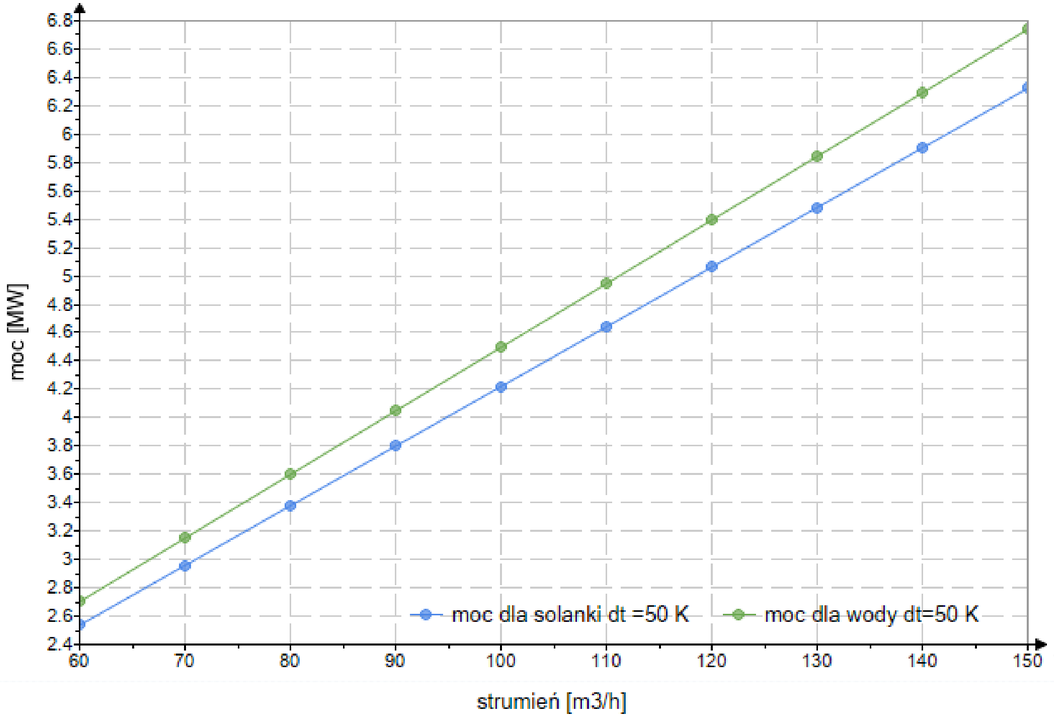


Wpływ mineralizacji na uzyskiwane efekty energetyczne (tylko U4GEfm)

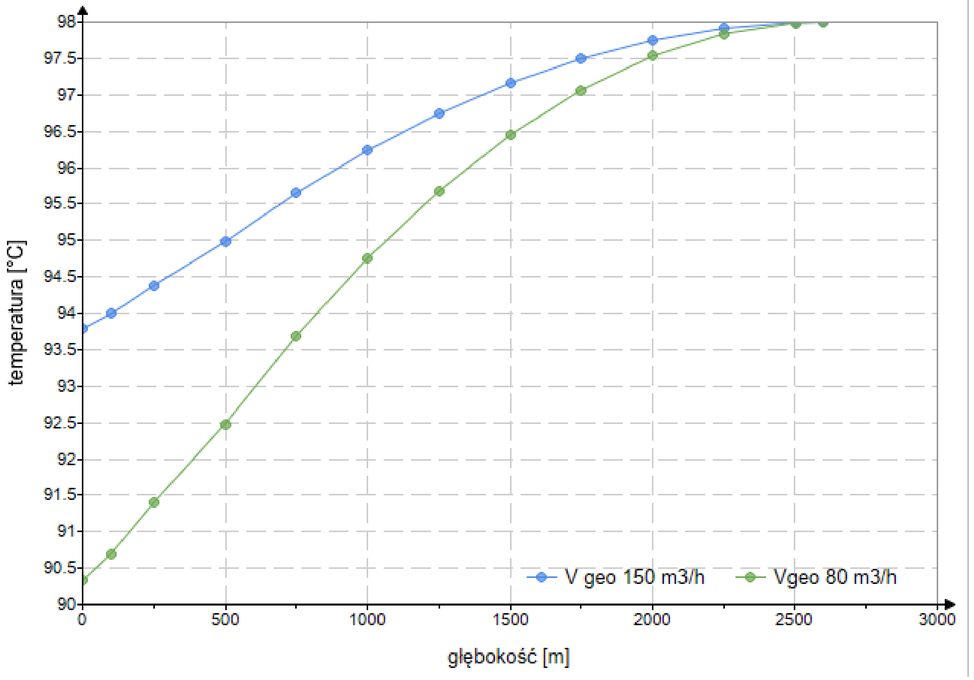
$$TDS := 150 \cdot \frac{gm}{kg}$$

$$\Delta t := 40 \cdot K \quad \text{“◄– schłodzenie solanki”}$$

Wpływ mineralizacji na moc ujęcia



Temperatura vs strumień



Redukcja strumienia wpływa na temperaturę głowicową

◄- Mineralizacja wpływa znacząco na uzyskiwaną moc

Właściwości płynu geotermalnego (tylko U4GEfm)

W oparciu o dane i zależności literaturowe

McCain, W.D. (1991) Reservoir-fluid property correlations-state of the art. SPE Reservoir Engineering, May 1991, pp. 266-272.

Jamieson D.T., Tudhope J.S., Morris R., Cartwright G., 1969. Physical properties of sea water solutions: heat capacity, Desalination, 7(1) 1969, pp. 23–30

Nayar, Kishor G., Mostafa H. Sharqawy, Leonardo D. Banchik,and John H. Lienhard V., 2016. Thermophysical Properties of Seawater: A Review and New Correlations That Include Pressure Dependence. Desalination 390, July 2016, pp. 1-24

D.T. Jamieson and J.S. Tudhope, Physical properties of sea water solutions – Thermal Conductivity, Desalination, 8 (1970) 393–401

IAPWS, 2011. Release on the IAPWS Formulation 2011 for the Thermal Conductivity of Ordinary Water Substance. The International Association for the Properties of Water and Steam. Plzeň, Czech Republic, September 2011

Sharqawy M.H., New correlations for seawater and pure water thermal conductivity at different temperatures and salinities, Desalination. 313 (2013) 97–104. doi:10.1016/j.desal.2012.12.010

Gęstość solanki lub wody

McCain 1991, pełen zakres TDS, temperatura do 127°C, ciśnienie do 34.5 MPa

$$\rho = \frac{16.018\left(62.368 + 0.438603\,S + 1.60074\cdot10^{-3}\,S^2\right)}{B_w} \quad (60)$$

$$B_w = \left(1 + \Delta V_{wp}\right)\cdot\left(1 + \Delta V_{wT}\right) \quad (61a)$$

$$p' = \frac{p}{6894{,}757},\ unit\ conversion:\ from\ p\ [Pa]\ to\ p'\ [psi] \quad (61b)$$

$$T' = 32 + \frac{9}{5}(T - 273{,}15), unit\ convertion:\ from\ T\ [K]\ to\ T'\ [°F] \quad (61c)$$

$$\Delta V_{wp} = -1{,}95301\cdot10^{-9}p'T' - 1{,}72834\cdot10^{-13}(p')^2T' - 3{,}58922\cdot10^{-7}p' - 2{,}25341\cdot 10^{-10}(p')^2 \quad (61d)$$

$$\Delta V_{wT} = -1{,}0001\cdot10^{-2} + 1{,}33391\cdot10^{-4}\,T' + 5{,}50654\cdot10^{-7}\,(T')^2 \quad (61e)$$

Lepkość dynamiczna solanki lub wody

McCain 1991, TDS do 26%, temperatura od 38 do 204°C, ciśnienie 1 atm

$$\mu_0 = A\,(T')^{-B} \cdot 10^{-3} \quad (62)$$

$$A = 109{,}574 - 8{,}40564\,S + 0{,}313314\,S^2 + 8{,}72213 \cdot 10^{-3}\,S^3 \quad (62a)$$

$$B = 1{,}12166 - 2{,}63951 \cdot 10^{-2}\,S + 6{,}79461 \cdot 10^{-4}\,S^2 + 5{,}47119 \cdot 10^{-5}\,S^3 - 1{,}55586 \cdot 10^{-6}\,S^4 \quad (62b)$$

McCain 1991, lepkość z ciśnienia atmosferycznego można następnie przeliczyć na ciśnienia w zakresie do 103.4 MPa i temp. 30-75°C:

$$\mu = \mu_0\,(0{,}9994 + 4{,}0295 \cdot 10^{-5} p' + 3{,}1062 \cdot 10^{-9}(p')^2) \quad (63)$$

Ciepło właściwe solanki lub wody

(Jameson et al. 1969) w funkcji zasilenia S, temperatury t i ciśnienia p

$$c_p \left[\frac{J}{kg\,K}\right] = c_{p0}\left[(p-0.1)\left(a1 + a2\,t + a3\,t^2 + a4\,t^3 + S(a5 + a6\,t + a7\,t^2 + a8\,t^3)\right)\right] \quad (64)$$

$$c_{p0} \left[\frac{kJ}{kg\,K}\right] = A + B\,(t + 273.15) + C\,(t + 273.15)^2 + D\,(t + 273.15)^3 \quad (64a)$$

$$A = 5.328 - 9.76\,10^{-2}S + 4.04\,10^{-4}S^2 \quad (64b)$$

$$B = -6.913\,10^{-3} + 7.351\,10^{-4}S - 3.15\,10^{-6}S^2 \quad (64c)$$

$$C = 9.6\,10^{-6} - 1.927\,10^{-6}S + 8.23\,10^{-9}S^2 \quad (64d)$$

$$D = 2.5\,10^{-9} + 1.666\,10^{-9}S - 7.125\,10^{-12}S^2 \quad (64e)$$

a1=-3.118

a2=0.0157

a3=5.1041 10^{-5}

a4=-1.0302 10^{-6}

a5=0.0107

a6=-3.9716 10^{-5}

a7=3.2088 10^{-8}

a8=1.0119 10^{-9}

Współczynnik przewodzenia ciepłą solanki lub wody

(Nayar et al., 2016) z dokładnością do 1.1% w zakresie 0°C<t<99°C i 0.1 MPa<p<140 MPa

$$\lambda(p,T) = \lambda_0 \left(1 + A \frac{p-0.1}{139.9}\right) \quad (66)$$

$$A = 13.464 \left(\frac{T}{300\,K}\right)^4 - 60.727 \left(\frac{T}{300\,K}\right)^3 + 102.81 \left(\frac{T}{300\,K}\right)^2 - 77.387 \frac{T}{300\,K} + 21.942 \quad (66a)$$

Wymienniki ciepła, zakłada się płytowe, przeciwprądowe (tylko U4GEfm)

The equations allow to determine outer temperature of fluids exchanges heat in a heat exchanger are:

$$\begin{cases} m_h c_h|_{t_{h2}}^{t_{h1}}(t_{h1}-t_{h2}) = m_c c_c|_{t_{c1}}^{t_{c2}}(t_{c2}-t_{c1}) + P_{ls} \\ m_h c_h|_{t_{h2}}^{t_{h1}}(t_{h1}-t_{h2}) = kF\Delta t_m + P_{ls} \end{cases} \quad (50)$$

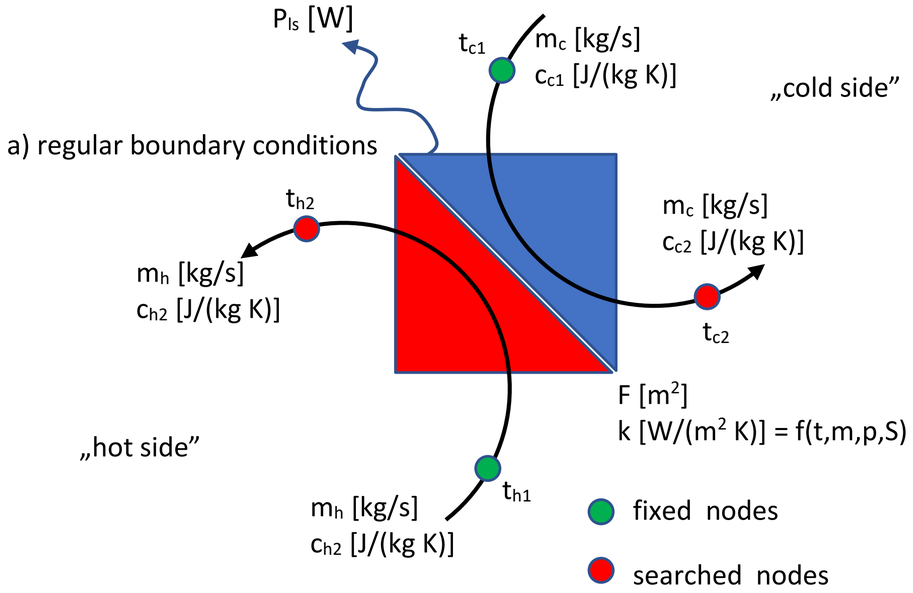
$$if\left[\frac{t_{h1}-t_{c2}}{t_{h2}-t_{c1}} \le 0.5 \; and \; \left((t_{h1}-t_{c2}) > (t_{h2}-t_{c1})\right)\right] then \; \Delta t_m = \frac{(t_{h1}-t_{c2})-(t_{h2}-t_{c1})}{ln\left(\frac{t_{h1}-t_{c2}}{t_{h2}-t_{c1}}\right)} \quad (50a)$$

$$if\left[\frac{t_{h1}-t_{c2}}{t_{h2}-t_{c1}} > 0.5 \; and \; \left((t_{h1}-t_{c2}) \ge (t_{h2}-t_{c1})\right)\right] then \; \Delta t_m = \frac{(t_{h1}-t_{c2})+(t_{h2}-t_{c1})}{2} \quad (50b)$$

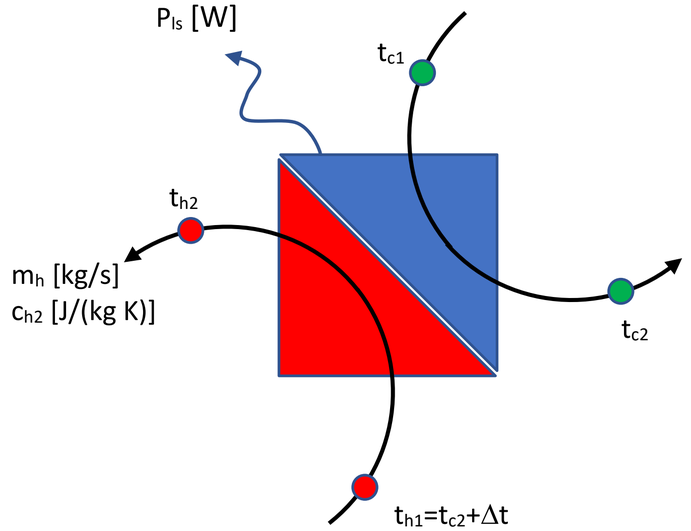
$$if\left[\frac{t_{h2}-t_{c1}}{t_{h1}-t_{c2}} \le 0.5 \; and \; \left((t_{h1}-t_{c2}) < (t_{h2}-t_{c1})\right)\right] then \; \Delta t_m = \frac{(t_{h2}-t_{c1})-(t_{h1}-t_{c2})}{ln\left(\frac{t_{h2}-t_{c1}}{t_{h1}-t_{c2}}\right)} \quad (50c)$$

$$if\left[\frac{t_{h2}-t_{c1}}{t_{h1}-t_{c2}} > 0.5 \; and \; \left((t_{h1}-t_{c2}) < (t_{h2}-t_{c1})\right)\right] then \; \Delta t_m = \frac{(t_{h1}-t_{c2})+(t_{h2}-t_{c1})}{2} \quad (50d)$$

Obliczenia opisujące intensywność wymiany ciepła bazują na liczbach kryterialnych Nu, Pr, Gr, Re, Gz



b) boundary conditions setting in case when the cold side limits working conditions



Kotły, na przykładzie kotła na paliwo gazowe
(tylko U4GEfm)

Moc nominalna 1,5 MW, temp. spalin w komorze 900°C, na wyjściu z kotła 50°C.

Temp. nominalna wody chłodzącej wejście 40°C, wyjście 60°C

Dopuszczalna temp. spalin. Dla niekondensacyjnych 09-200°C, dla kondensacyjnych <90°C.

Zawartość CH4 w gazie [$\%_{obj}$]

$$FGasBoiler\left(1.5\cdot MW,\begin{bmatrix}900 & 60\\ 50 & 40\end{bmatrix}\cdot K,100\cdot K,\begin{bmatrix}0.001 & 1\\ 0.015 & 0\end{bmatrix},0.97,41.5\cdot\frac{10^6\cdot J}{m^3},1.05,1.5\cdot bar,5\cdot\frac{gm}{kg},50\cdot\frac{m^3}{hr},\begin{bmatrix}35\\ 48\end{bmatrix}\cdot K\right)=\begin{bmatrix}\left(7.463\cdot 10^5\right) W\\ 0.021\ \frac{m^3}{s}\\ 100\ K\\ \left(3.722\cdot 10^7\right) Pa\\ 0.962\\ 0\ \frac{kg}{m^3}\\ 0.154\ \frac{kg}{m^3}\\ [8\times 1]\\ 11.124\end{bmatrix}$$

Ciepło spalania – skład gazu uzupełniany jest przez C_3H_8, tak by dostać Q_c.

Straty inne niż kominowe, np. straty przez obudowę.

Dla kotłów konwencjonalnych typowe wartości to Straty(1,1)=0.005, Straty(2,1)=0.05, Straty(1,2)=1, Straty(2,2)=0.
Dla kotłów kondensacyjnych może być Straty(1,1)=0, Straty(2,1)=0, Straty(1,2)=1, Straty(2,2)=0

Wsp. nadmiaru powietrza

Wilgotność powietrza do spalania

Ciśnienie spalin w komorze spalania

Strumień wody grzanej przez kocioł, temperatura na wejściu i wyjściu z kotła.

Kotły, na przykładzie kotła na paliwo gazowe

Moc chwilowa kotła

Strumień spalin

Temp. spalin w wyjściu z kotła

Wartość opałowa gazu

$$FGasBoiler\left(1.5\cdot MW,\begin{bmatrix}900 & 60\\ 50 & 40\end{bmatrix}\cdot K,100\cdot K,\begin{bmatrix}0.001 & 1\\ 0.015 & 0\end{bmatrix},0.97,41.5\cdot\frac{10^6\cdot J}{m^3},1.05,1.5\cdot bar,5\cdot\frac{gm}{kg},50\cdot\frac{m^3}{hr},\begin{bmatrix}35\\ 48\end{bmatrix}\cdot K\right)=\begin{bmatrix}(7.463\cdot 10^5)\ W\\ 0.021\ \frac{m^3}{s}\\ 100\ K\\ (3.722\cdot 10^7)\ Pa\\ 0.962\\ 0\ \frac{kg}{m^3}\\ 0.154\ \frac{kg}{m^3}\\ [8\times 1]\\ 11.124\end{bmatrix}$$

Sprawność kotła odniesiona do wartości opałowej

Ilość wykraplanej pary wodnej

Ilość pary wodnej w spalinach

Ilość jednostkowa spalin [$m^3_{\text{spalin wilgotnych}}/m^3_{\text{paliwa}}$]

$$\begin{bmatrix}0\\ 0.095\\ 0.192\\ 0.009\\ 0.704\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.0\\ CO2sp2\\ H2Osp2\\ O2sp2\\ N2sp2\\ 0.0\\ 0.0\\ 0.0\end{bmatrix}$$

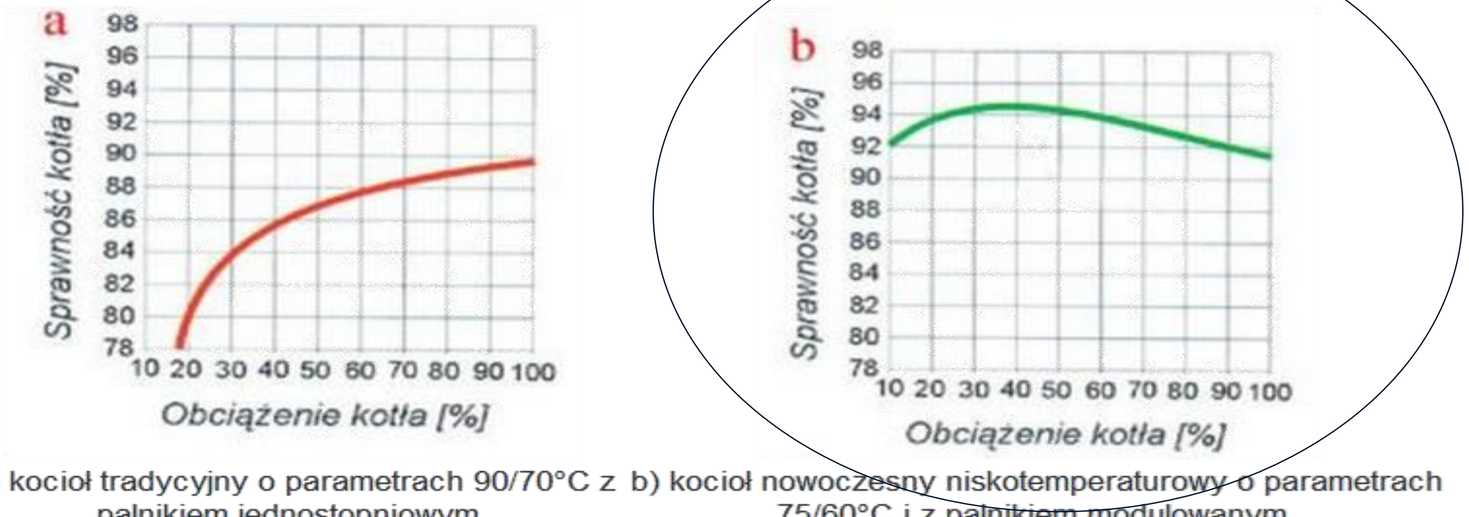
Objętościowy skład spalin

Jak wg danych producentów zmienia się sprawność kotłów w funkcji wydajności

Kotły niekondensacyjne

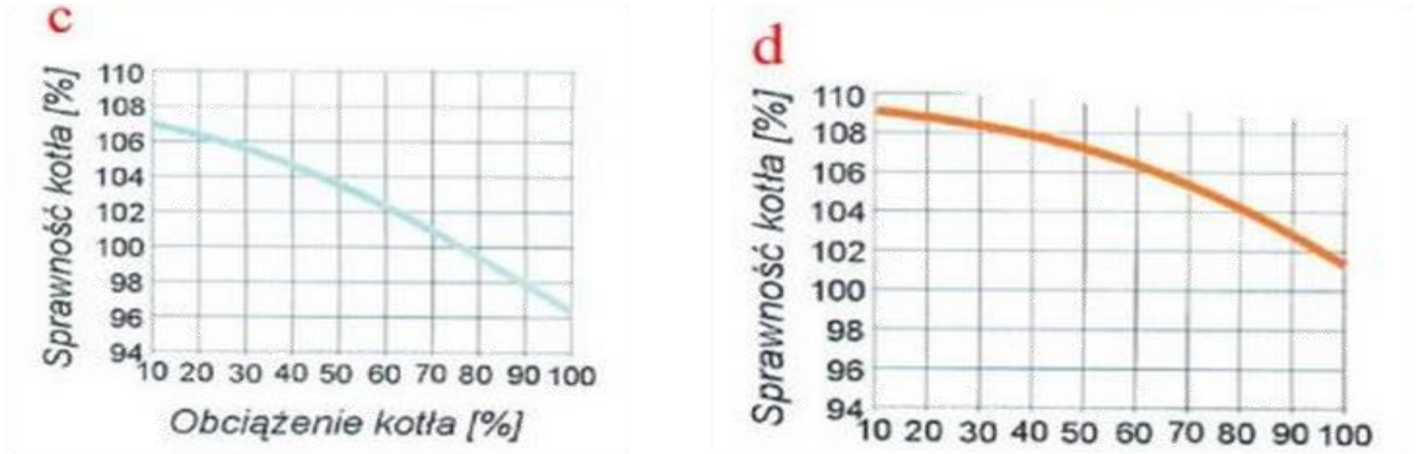
Kotły kondensacyjne:
wzrost wydajności – spadek sprawności

Przykładowe wykresy sprawności kotłów w zależności od obciążenia kotła:



a) kocioł tradycyjny o parametrach 90/70°C z palnikiem jednostopniowym,

b) kocioł nowoczesny niskotemperaturowy o parametrach 75/60°C i z palnikiem modulowanym,

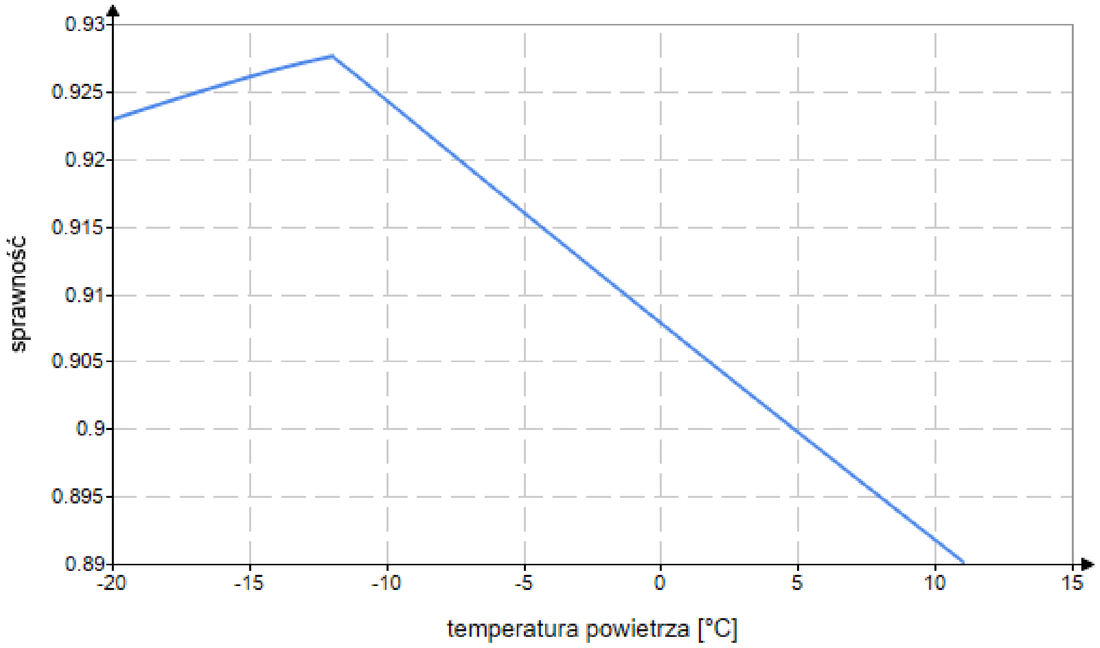


c) kocioł kondensacyjny o parametrach 75/60°C z palnikiem modulowanym,

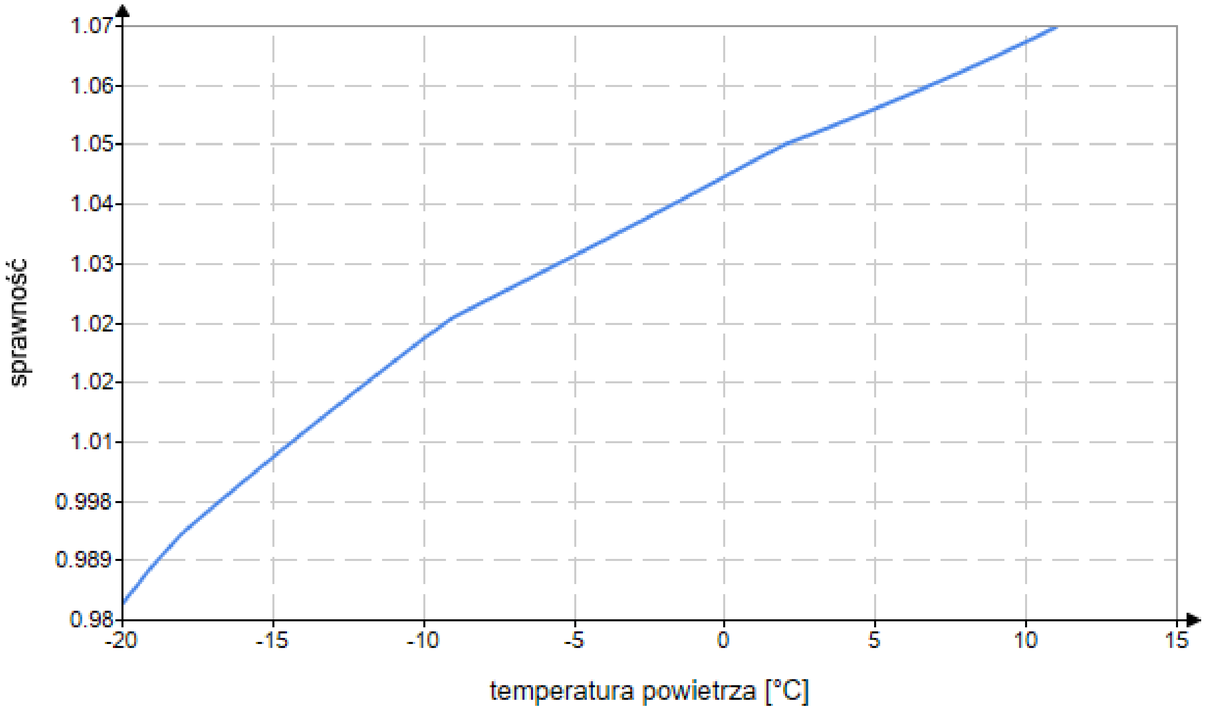
d) kocioł kondensacyjny o parametrach 40/30°C z palnikiem modulowanym

Porównanie sprawności gazowego kotła kondensacyjnego i niekondensacyjnego

Kocioł niekondensacyjny (75-60°C)



Kocioł kondensacyjny (75/60°C)



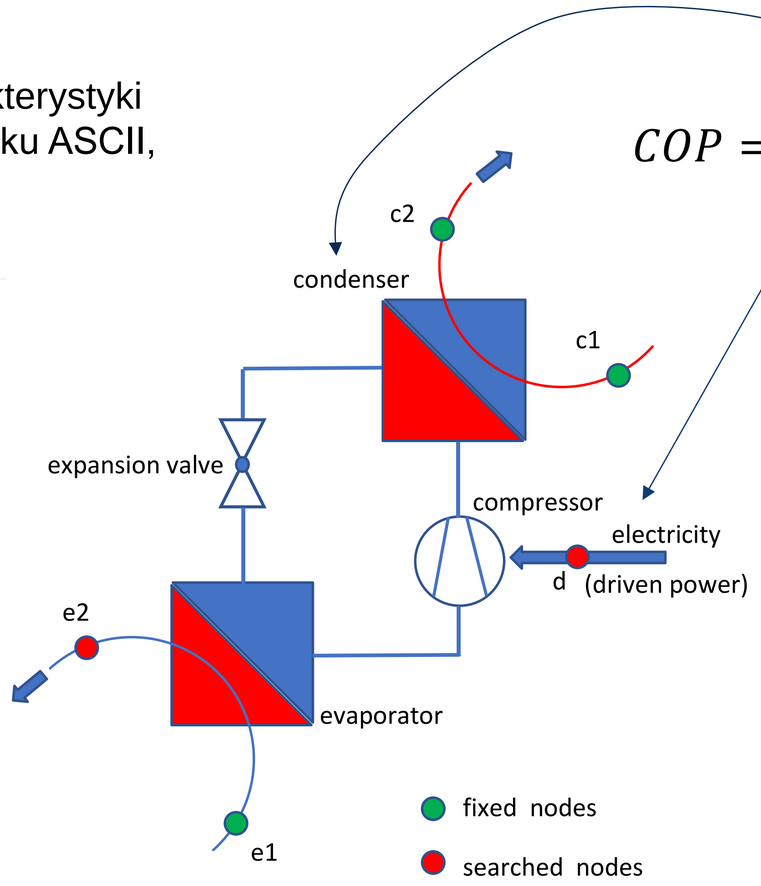
Sprężarkowe pompy ciepła (tylko U4GEfm)

Algorytm pozwala na wprowadzenie charakterystyki dowolnej pompy sprężarkowej w postaci pliku ASCII, jako COP = f(t_c,t_e)

temperatura skraplania [°C]

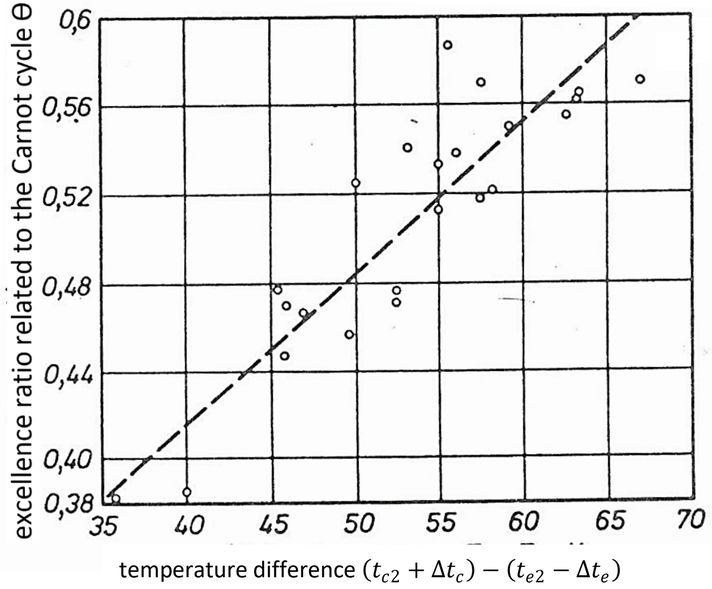
temperatura parowania [°C]

te	tc					
0	30	40	50	70	100	1000
-20	3.1	2.7	2.2	1.5	1.0	1.0
-10	4.3	3.5	2.8	2.0	1.4	1.0
0	6.0	4.5	3.5	2.5	1.6	1.0
5	7.5	5.3	4.1	2.8	1.8	1.0
10	9.0	6.4	4.9	3.2	1.9	1.0
20	11.	7.6	5.8	3.8	2.2	1.0
30	12.9	8.9	6.7	4.3	2.5	1.0
40	14.9	10.1	7.6	4.9	2.8	1.0
50	16.9	11.3	8.5	5.5	3.1	1.0
60	18.8	12.6	9.4	6.0	3.4	1.0
70	20.8	13.8	10.3	6.6	3.7	1.0
80	22.8	15.1	11.2	7.2	4.0	1.0
90	24.7	16.3	12.1	7.7	4.3	1.0
100	26.7	17.5	13.0	8.3	4.6	1.0



$$COP = \frac{P_c}{P_d} = \frac{\dot{m}_{c1}\, c\, (t_{c2} - t_{c1})}{P_d} = \frac{\dot{V}_{c1}\, \rho\, c\, (t_{c2} - t_{c1})}{P_d}$$

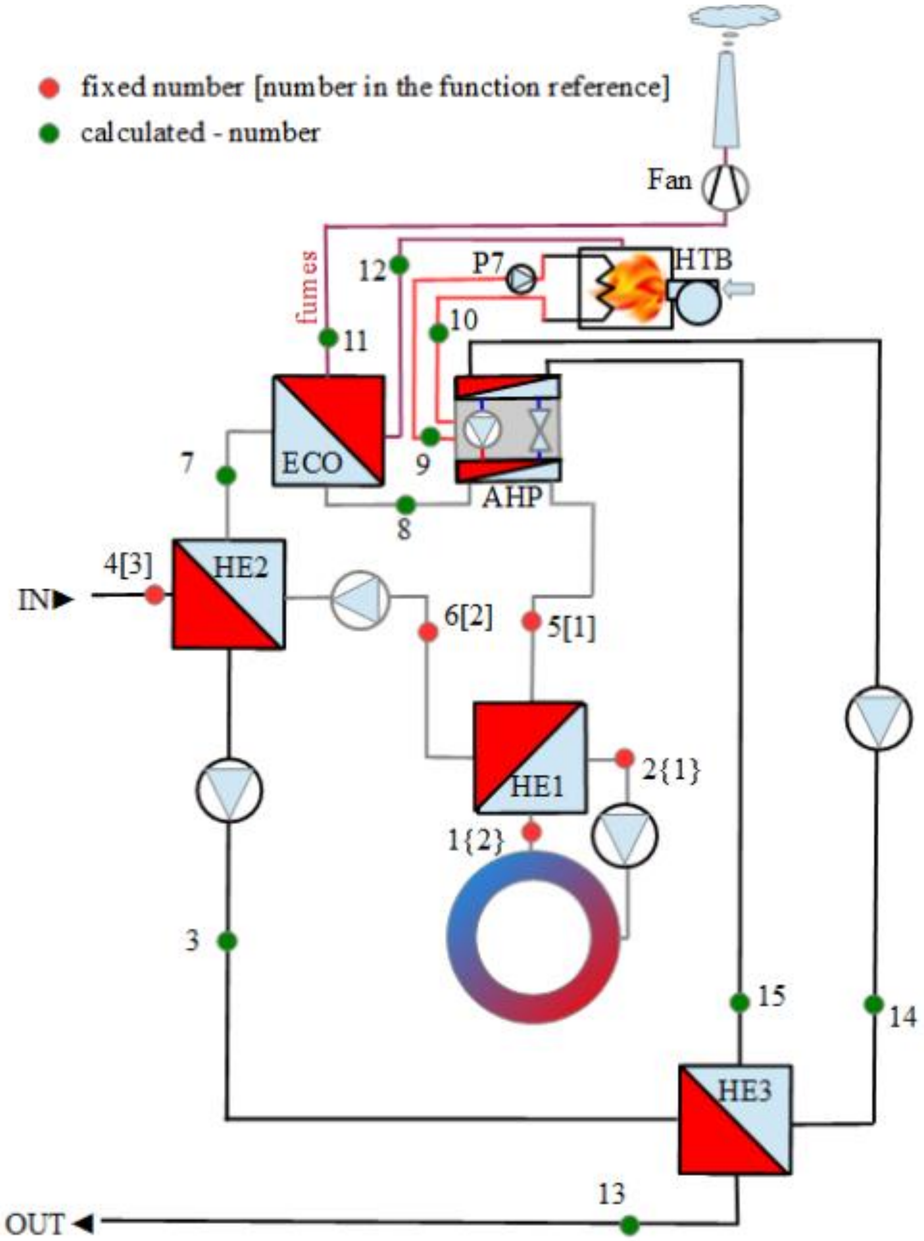
$$COP = \Theta\, \frac{t_{c2} + 273.15\, K\ + \Delta t_c}{(t_{c2} + \Delta t_c) - (t_{e2} - \Delta t_e)}$$



Wykorzystując (Szargut J. Termodynamika techniczna. PWN, 2010) współczynnik doskonałości:

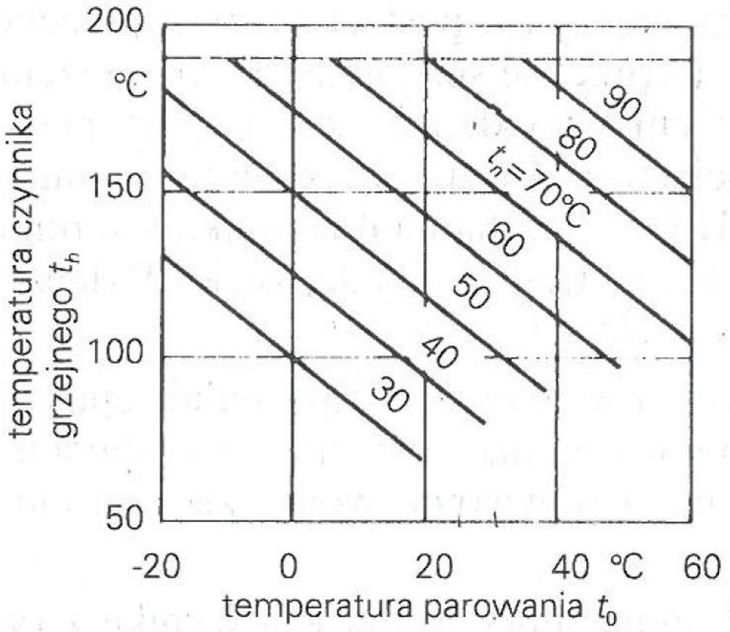
$$\Theta = 6.6\ 10^{-3}\ \{[(t_{c2} + \Delta t_c) - (t_{e2} - \Delta t_e)] - 36\ K\} + 0.39$$

Absorpcyjne pompy ciepła napędzane wysokotemperaturowym kotłem gazowym z ekonomizerem (tylko U4GEfm)

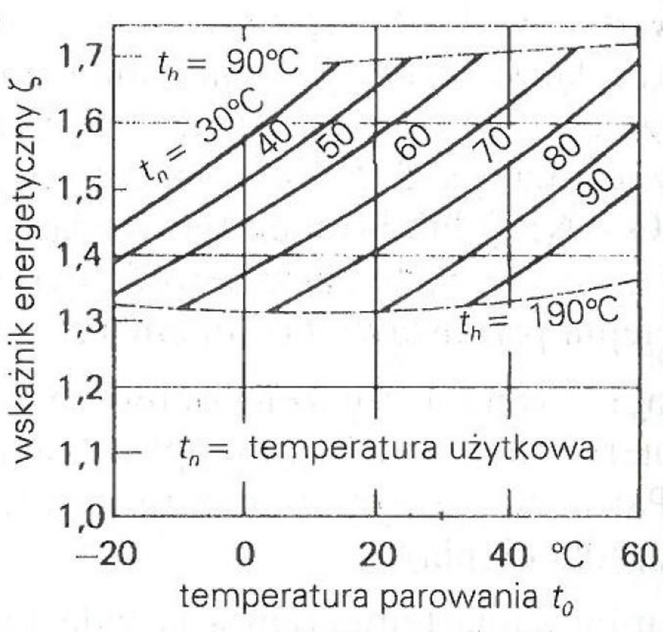


N – number of a calculation node
[n] number of a row of the input vector
{n} number of nodes, included to calculations only if designe power of HE1 > 0 W.
Nodes 5 and 6 are then unknown. The solution is alternative.

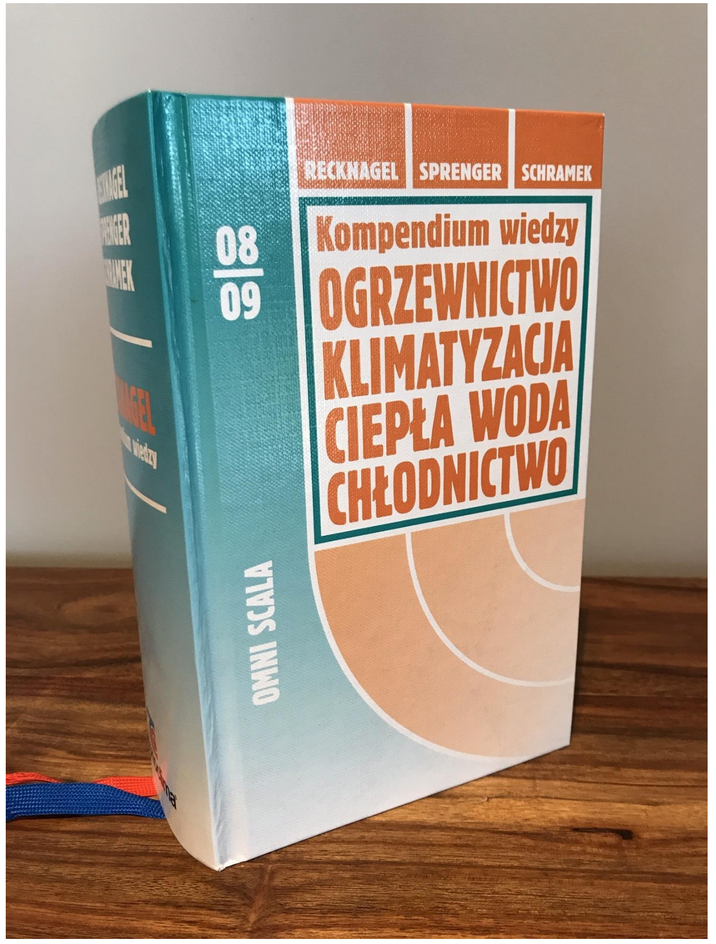
Absorpcyjne pompy ciepła napędzane wyskotemperaturowym kotłem gazowym z ekonomizerem



Rys. 225-77. Najniższe temperatury czynnika grzejnego dla absorpcyjnych pomp ciepła



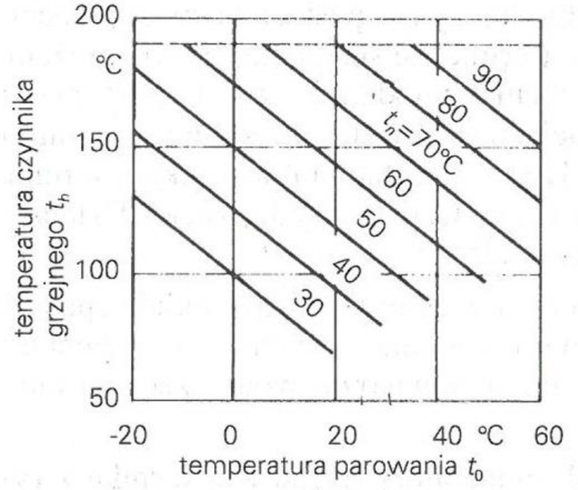
Rys. 225-77a. wskaźnik energetyczny ζ absorpcyjnych pomp ciepła



Absorpcyjne pompy ciepła napędzane wyskotemperaturowym kotłem gazowym z ekonomizerem

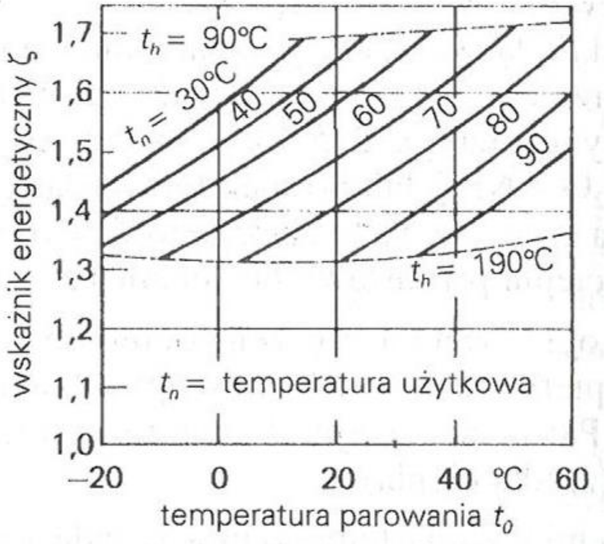
Wymagana temperatura zasilania pompy ciepła w funkcji temperatury źródła górnego i dolnego

tpar	tzas [°C]							
	30.	40.	50.	60.	70.	80.	90.	100.
-20.	132.2	158.2	182.2	216.32	1000.0	1000.0	1000.0	1000.
0.	100.5	126.0	151.5	174.0	205.3	1000.0	1000.0	1000.
20.	68.8	94.2	119.2	143.7	168.3	191.3	215.4	245.
40.	40.0	66.8	88.5	113.5	134.0	161.1	182.7	205.
60.	60.0	60.0	60.0	86.1	106.7	130.3	152.4	180.
70.	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	100.0	120.0	155.



Współczynnik efektywności w funkcji temperatury źródła górnego i dolnego

teva	|---------- tcond [°C] ----------|						
	30.	40.	50.	60.	70.	80.	90.	100.
-20.	1.47	1.42	1.37	1.	1.	1.	1.	1.
-11.	1.54	1.48	1.42	1.34	1.	1.	1.	1.
3.	1.66	1.58	1.52	1.42	1.34	1.	1.	1.
20.	1.82	1.72	1.64	1.54	1.46	1.34	1.	1.
33.	2.00	1.82	1.74	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26
46.	1.00	1.00	1.89	1.75	1.65	1.56	1.47	1.38
57.	1.00	1.00	1.00	1.90	1.75	1.66	1.55	1.45
70.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.77	1.65	1.55



Emisja zanieczyszczeń, wg wskaźników KOBiZE
(tylko U4GEfm)

____[g/GJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pollutant_	P_gaz	P_ciek	WK<50kW	W<500kW	W<500kW	W<0.5MW	WK_k15	WK_EP	WK_<1MW	WK<5MW	BM<50kW	BM<50kW	BM<50kW	BMauto	BM_EP5	BMEP5a	BM<5MW	EnElekt
Pył_calk__	0.5	2.	600.	350.	150.	90.	36.	22.	80.	80.	550.	350.	45.	50.	40.	20.	90.	7.2
PM10_____	0.5	2.	534.	312.	134.	80.	32.	20.	71.	71.	522.	333.	43.	48.	38.	19.	86.	-1
PM2,5____	0.5	2.	414.	242.	104.	62.	25.	16.	55.	55.	495.	315.	41.	45.	36.	18.	81.	-1
CO2______	57650.	72480.	96370.	96370.	96370.	96935.	92200.	92200.	97800.	97800.	101100.	101100.	101100.	101100.	101100.	101100.	101100.	1.939E5
CO_______	30.	30.	4500.	2500.	1500.	400.	400.	280.	400.	200.	4.E3	3.E3	500.	350.	440.	260.	400.	56.4
NOx______	50.	70.	100.	160.	170.	220.	190.	190.	200.	180.	60.	80.	100.	100.	120.	100.	150.	145.
SOx______	0.4	80.	400.	410.	410	410.	450.	450.	418.	418.	15.	15.	15.	15.	11.	11.	25.	141.4
B(a)P____	8.0E-7	1.0E-4	0.3	0.35	0.09	0.016	0.03	0.015	0.013	0.013	0.2	0.13	0.023	0.015	0.015	0.010	0.013	-1

Objaśnienia:
Wartość <0 oznacza, że nie podano wskaźnika.
Wskaźniki podano w [g/GJ energii chemicznej zawartej w paliwie] - nie uwzględniają one zatem sprawności procesu spalania
1. Paliwa gazowe
2. Paliwa ciekłe
3. Węgiel kamienny. Ogrzewacze pomieszczeń (piece, piecokuchnie, kominki, piece kaflowe) o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,05 MW
4. Węgiel kamienny. Kotły tradycyjne z ręcznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
5. Węgiel kamienny. Kotły zaawansowane z ręcznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
6. Węgiel kamienny. Kotły z automatycznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
7. Węgiel kamienny. Kotły z ręcznym podawaniem paliwa spełniające wymogi Ekoprojektu* i klasy 5 wg PN-EN 303-5:2012 o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
8. Węgiel kamienny. Kotły z automatycznym podawaniem paliwa spełniające wymogi Ekoprojektu* i klasy 5 wg PN-EN 303-5:2012 o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
9. Węgiel kamienny. Źródła spalania o nominalnej mocy cieplnej > 0,5 MW i ≤ 1 MW
10. Węgiel kamienny. Źródła spalania o nominalnej mocy cieplnej > 1 MW i ≤ 5 MW
11. Biomasa. Ogrzewacze pomieszczeń (piece, piecokuchnie, kominki, piece kaflowe) o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,05 MW
12. Biomasa. Kotły tradycyjne z ręcznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
13. Biomasa. Kotły zaawansowane z ręcznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
14. Biomasa. Kotły z automatycznym podawaniem paliwa o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
15. Biomasa. Kotły z ręcznym podawaniem paliwa spełniające wymogi Ekoprojektu* i klasy 5 wg PN-EN 303-5:2012 o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
16. Biomasa. Kotły z automatycznym podawaniem paliwa spełniające wymogi Ekoprojektu* i klasy 5 wg PN-EN 303-5:2012 o nominalnej mocy cieplnej ≤ 0,5 MW
17. Biomasa. Źródła spalania o nominalnej mocy cieplnej > 0,5 MW i ≤ 5 MW
18. Energia elektryczna

Założenia dotyczące części ekonomicznej

Zarówno U4GEfm jak i U4GEcalc nie obejmują nakładów inwestycyjnych związanych z ujęciem geotermalnym.

Zakłada się, że ujęcie geotermalne byłoby lub już zostało wykonane, niezależnie od prac prowadzonych w systemie instalacji powierzchniowej.
Wszystkie przedsięwzięcia związane z zabiegami termomodernizacyjnymi określa się nakładami brutto – płacą za nie odbiorcy energii.

Zakup nośników energii oraz zabiegi prowadzone w źródle są nakładami netto, realizuje je płatnik podatku VAT.

Wnioski

Miało powstać możliwie proste narzędzie opisujące wpływ temperatury roboczej na główne procesy wpływające na ocenę energetyczną, ekonomiczną i ekologiczną.

Cel ten udało się osiągnąć.

Czego model nie uwzględnia ilościowo: efektów związanych z wytrącaniem, kolmatacją i innymi problemami z zatłaczaniem.

Dziękuję za uwagę

Leszek Pająk
pajak@meeri.pl