



Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska

Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych
Politechnika Warszawska

Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES

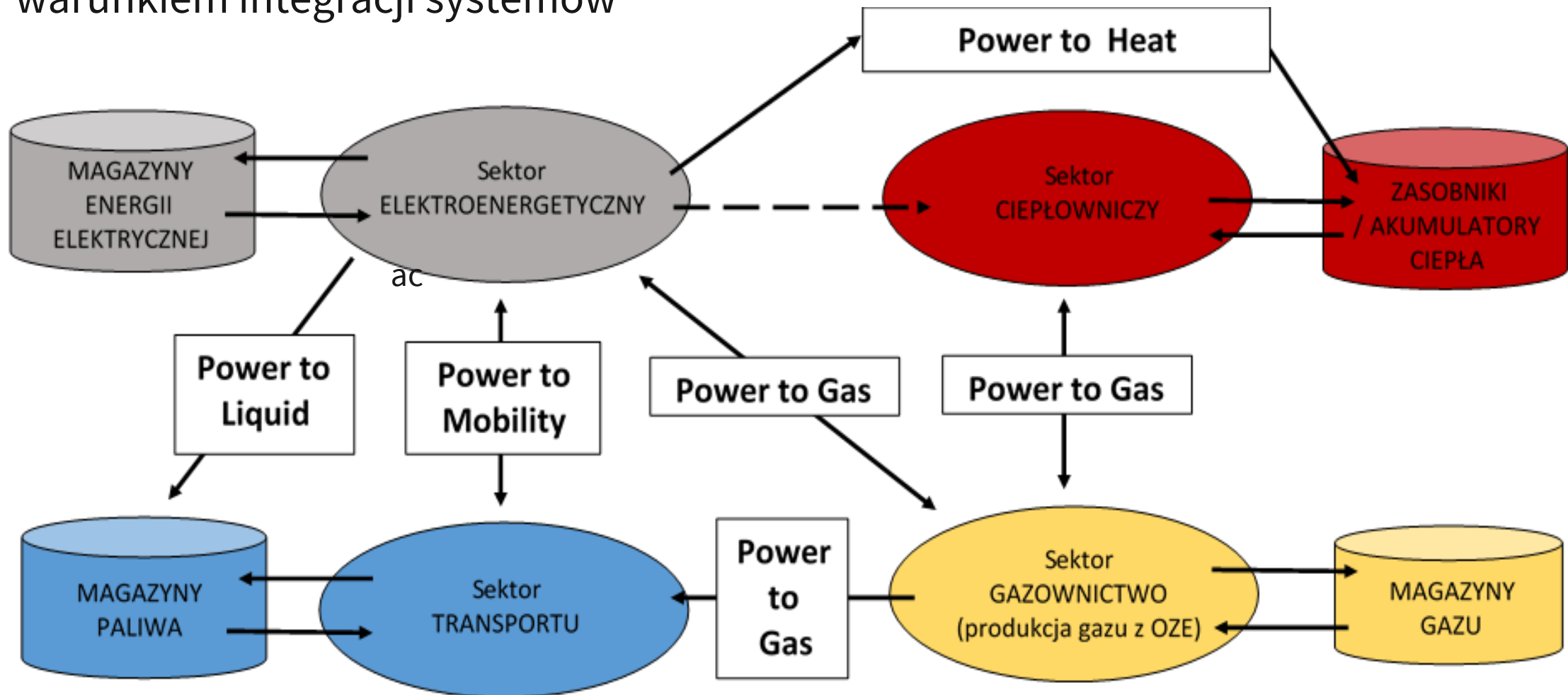
Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz
Dr hab. inż. Małgorzata Kwestarz
Dr inż. Łukasz Kotyński

XX Konferencja Techniczna IGCP

16 listopada 2023 r.



Procesy magazynowania
warunkiem integracji systemów





Zasobniki ciepła służą do wyrównywania obciążeń urządzeń wytwórczych produkujących energię cieplną i elektryczną przy zmiennym zapotrzebowaniu przez odbiorców. Mogą gromadzić nośnik energii, by następnie oddawać go w czasie okresu wyłączenia urządzeń. Charakterystyczną cechą działania zasobników jest cykliczność ich pracy tzn. następujące po sobie kolejne fazy ładowania i rozładowania. Zasobniki magazynujące ciepło w okresie doby i do kilku dni nazywa się krótkoterminowymi, natomiast zasobniki długoterminowe wyrównują różnice w podaży i zapotrzebowaniu na energię w cyklu rocznym.



Zasobniki ciepła wykonuje się w postaci pionowych cylindrycznych zbiorników całkowicie wypełnionych wodą. Woda jako czynnik termodynamiczny jest dobrym nośnikiem akumulującym energię cieplną, a przy tym tanim i powszechnym medium. Wykorzystuje się dużą pojemność cieplną wody i naturalny efekt wyporu wody w różnych temperaturach. Gorące strefy o niższej gęstości przemieszczają się do górnej części zbiornika, a zimne strefy o wyższej gęstości do dolnej.

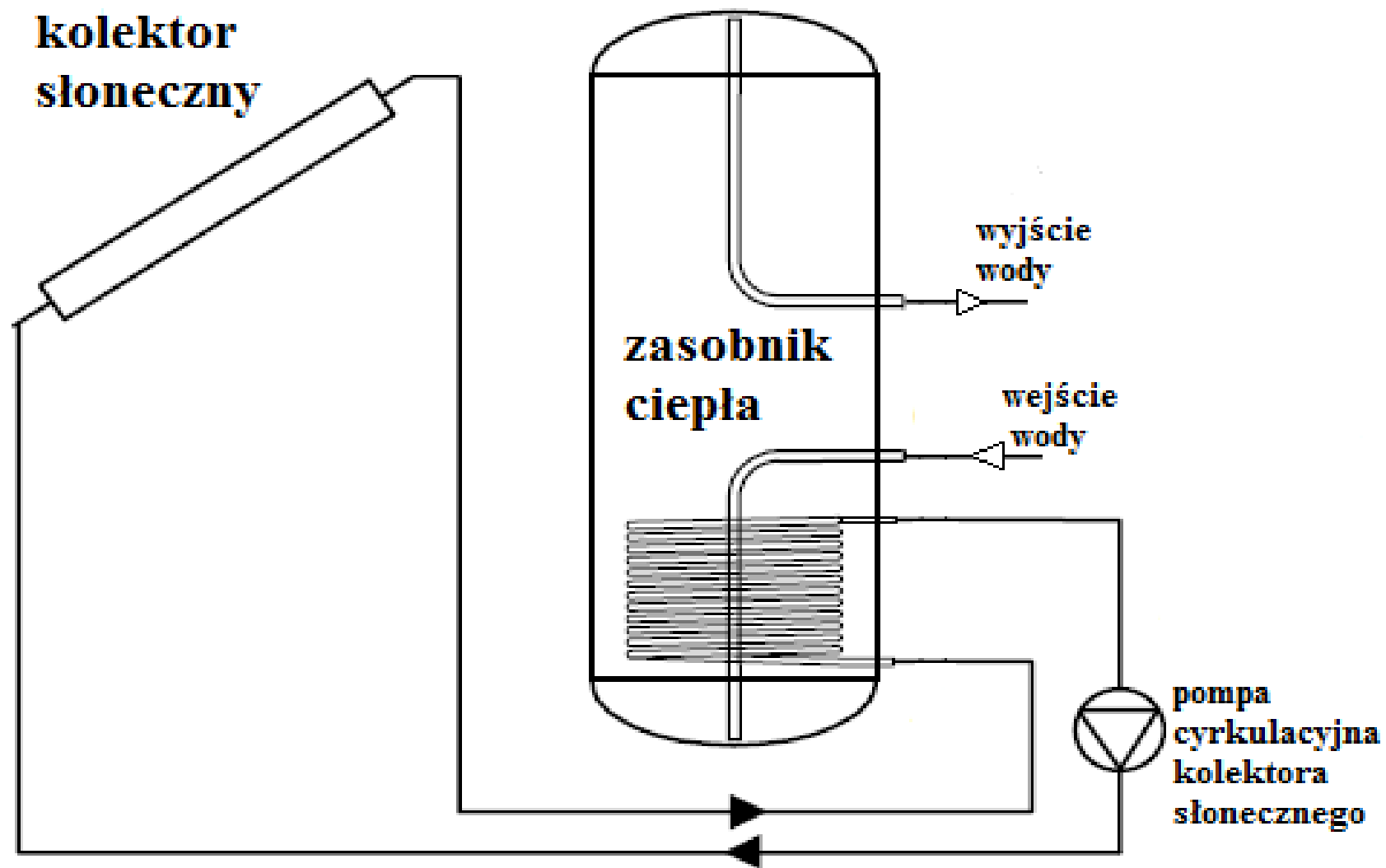


Zasobniki ciepła można stosować w scentralizowanych źródłach ciepła, jakimi są elektrociepłownie miejskie produkujące energię cieplną i elektryczną w kogeneracji.

Wraz z rozwojem wykorzystania odnawialnych źródeł energii wśród indywidualnych odbiorców na znaczeniu przybierają zasobniki ciepłej wody włączone w układ kolektorów słonecznych .



Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES





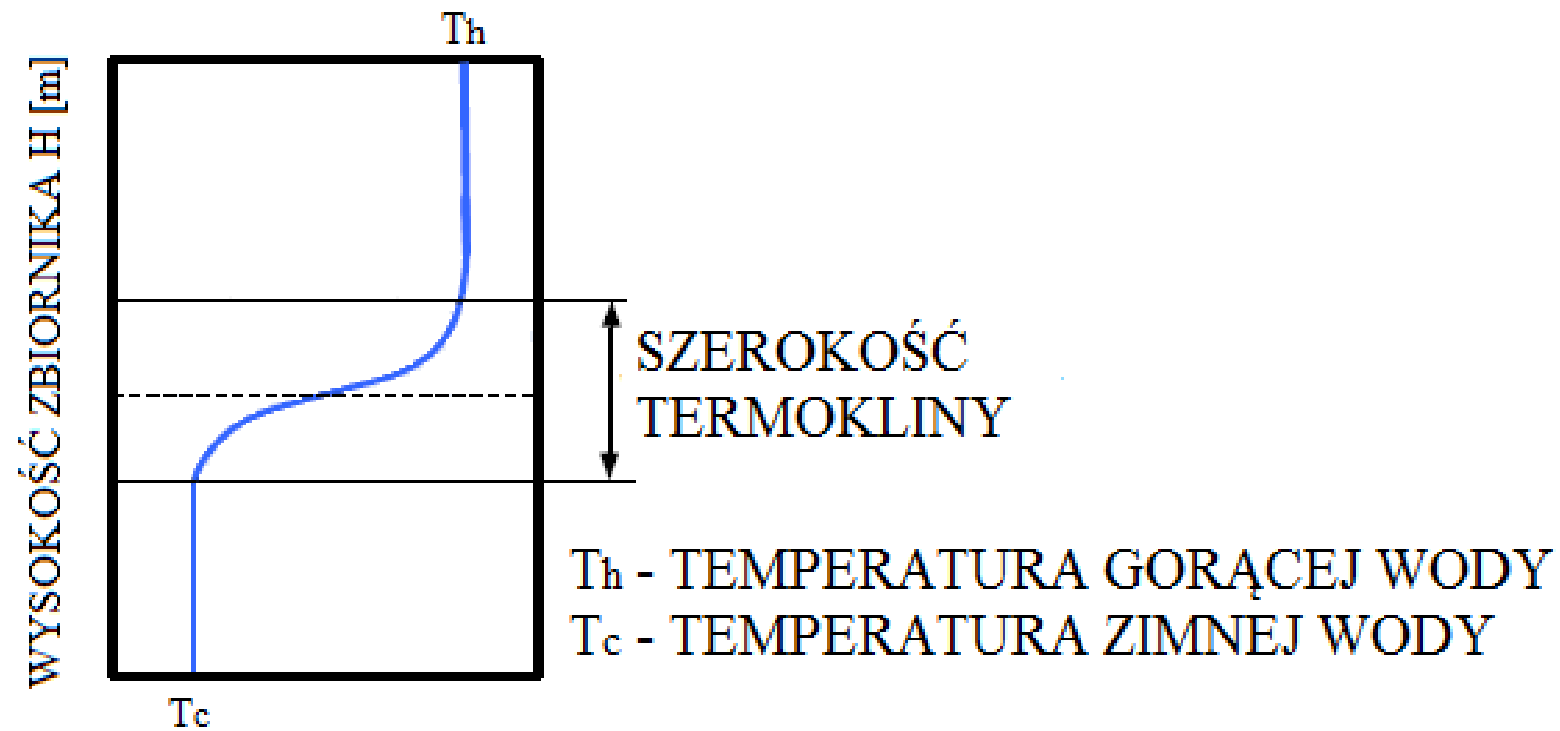
Zjawisko stratyfikacji termicznej zwiększa efektywność energetyczną zasobników ciepła.

Zjawisko stratyfikacji polega na temperaturowym zróżnicowaniu ośrodka, co prowadzi do jego warstwowej struktury. Wynika z gęstości wody gorącej i zimnej. Idealny przypadek występuje wtedy, gdy gorące i zimne strefy są całkowicie odrębne.

Woda gorąca, wypierana przez zimną wodę w dolnej części zbiornika, przemieszcza się do góry. Wytworzone warstwy wody zimnej i gorącej rozdziela warstwa pośrednia, w której następuje nagła zmiana temperatury magazynowanego czynnika, spowodowana intensywną wymianą ciepła między tymi warstwami. Grubość - termokliny powinna być możliwie jak najmniejsza.



Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES





Stratyfikację w zasobniku ciepła charakteryzuje termoklina – strefa temperatury rozdzielenia stref gorących i zimnych wody w zbiorniku. Grubość strefy termokliny jest wskaźnikiem prawidłowo zaprojektowanego zbiornika i powinna być możliwie jak najmniejsza, w celu zminimalizowania procesu mieszania się zimnej i ciepłej wody.

Głównym parametrem determinującym rolę termokliny w powstawaniu stratyfikacji jest smukłość zbiornika, czyli stosunek jego wysokości do średnicy - H/D , mającym wpływ na samoistne wytworzenie się warstw wody o zróżnicowanej temperaturze.



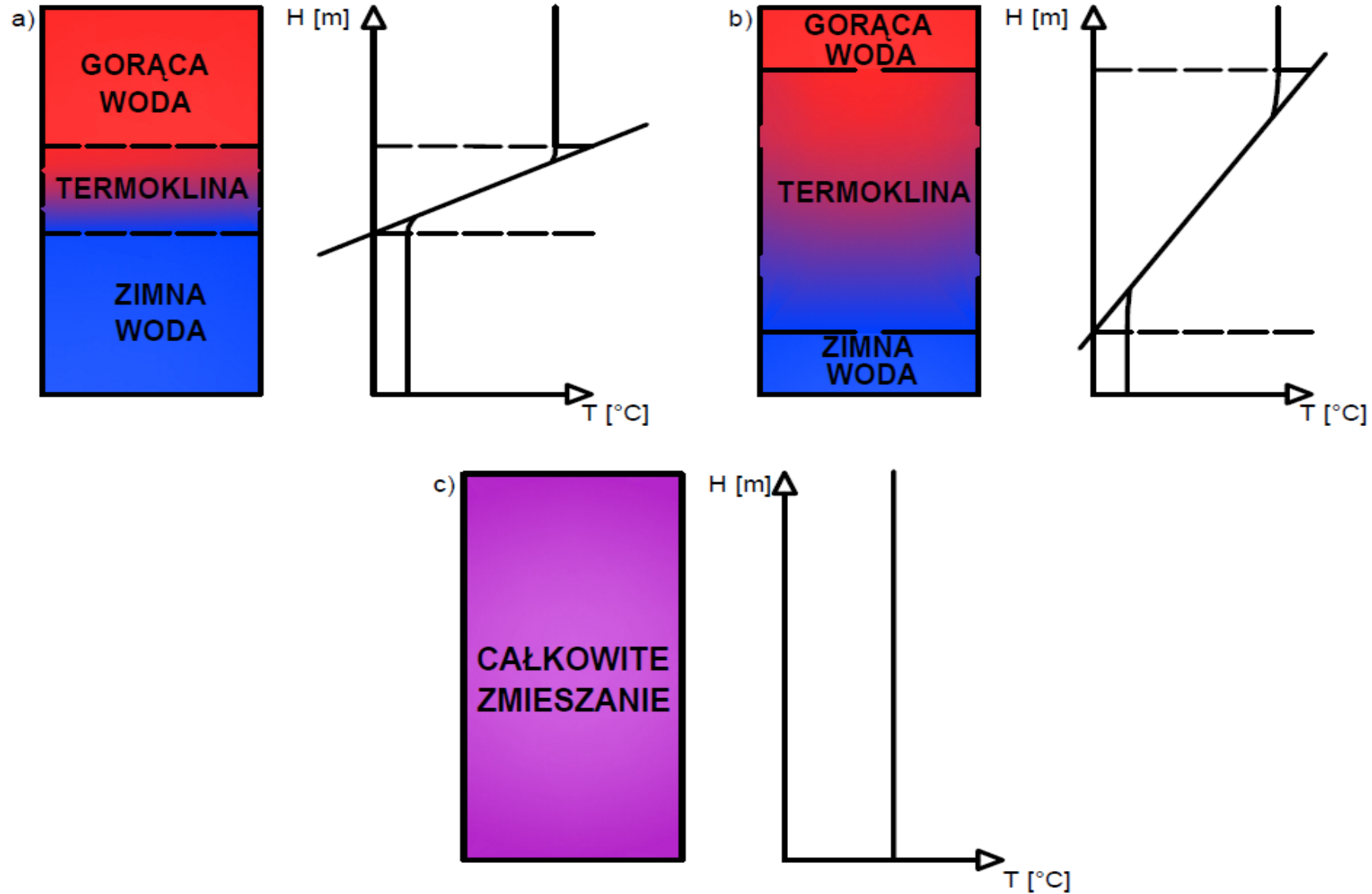
Smukłość zbiornika na poziomie $H/D = 4$ pozwala na uzyskanie maksymalnej stratyfikacji termicznej. Inne badania sugerują optymalną smukłość zbiornika w granicach między 3 a 4 . Wykazano, że grubość warstwy przejściowej wzrasta wraz ze wzrostem stosunku H/D .

Wyższa smukłość zbiornika zapewnia wyższy stopień stratyfikacji, co zwiększa także pole powierzchni zbiornika. Wywołuje to wzrost strat ciepła do otoczenia, co zmniejsza efektywność magazynowania.

.



Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES





Im większa różnica temperatury pomiędzy wodą gorącą a zimną w zbiorniku, tym skuteczniej powstaje zjawisko stratyfikacji. Temperatura pracy dla zasobników bezciśnieniowych powinna wynosić poniżej 100 °C. Odpowiednio do temperatury zasilania (bezpośrednio z bloków ciepłowniczych) temperatura zimnej wody wynosi około 40-55°C. W przypadku zasobników ciepłej wody włączonych w układ kolektorów różnica temperatur jest odpowiednio niższa, w zależności od wielu czynników wpływających na wydajność kolektorów słonecznych, takich jak warunki atmosferyczne.

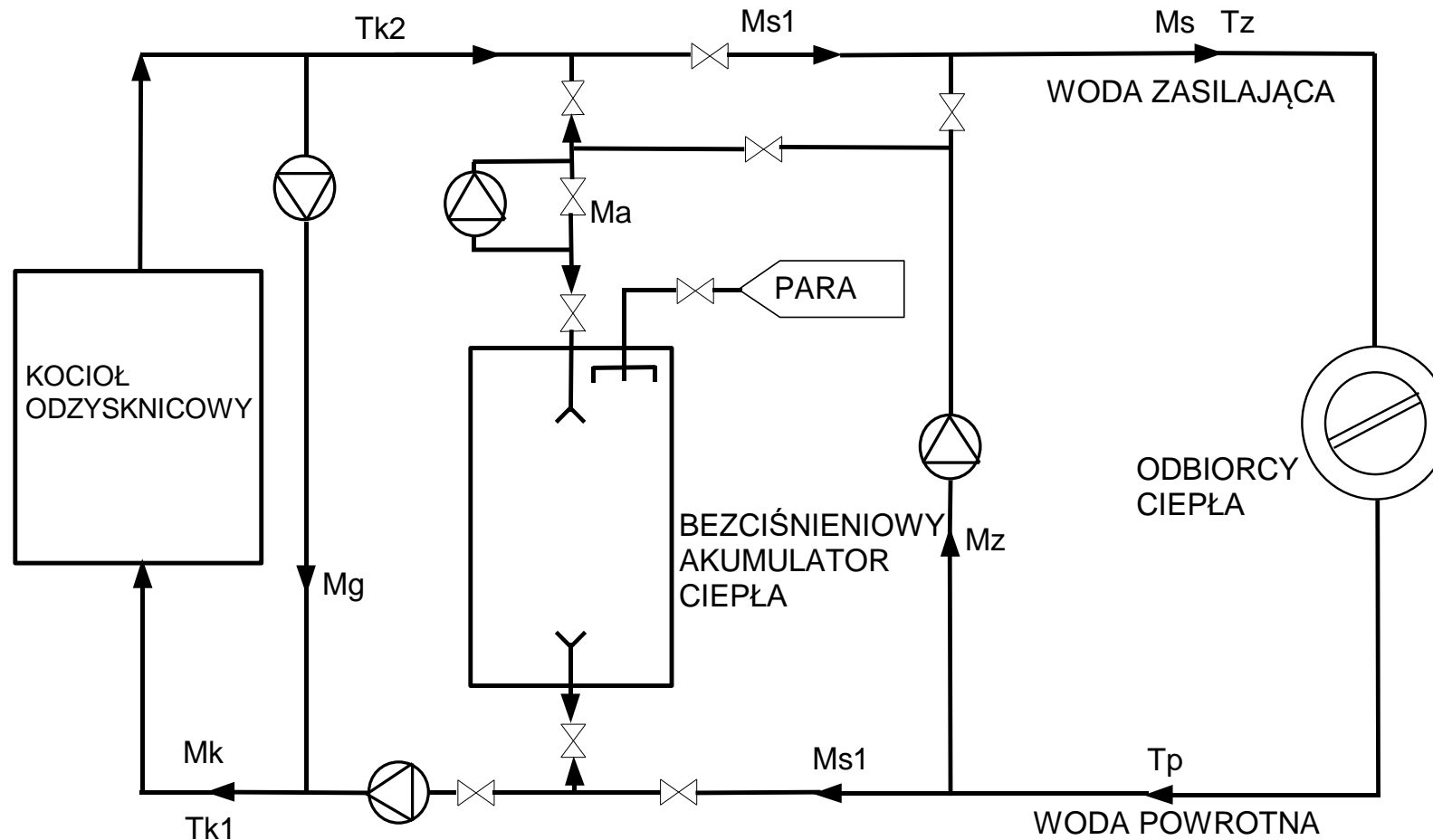


Ze względów wytrzymałościowych i ekonomicznych zbiorniki zasobników ciepła wykonuje się ze stali, której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 50-60 \text{ W/(mK)}$. Ścianki zbiornika, charakteryzujące się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła, przyczyniają się to do tworzenia się gradientu temperatury w ich pobliżu.

Każdy zbiornik, aby uniknąć strat ciepła do otoczenia, powinien być odpowiednio zaizolowany termicznie. Przeważnie stosuje się wełnę mineralną o grubości od 5 cm, co prawie zupełnie pozwala na uniknięcie strat ciepła przez ścianki zbiornika do otoczenia.

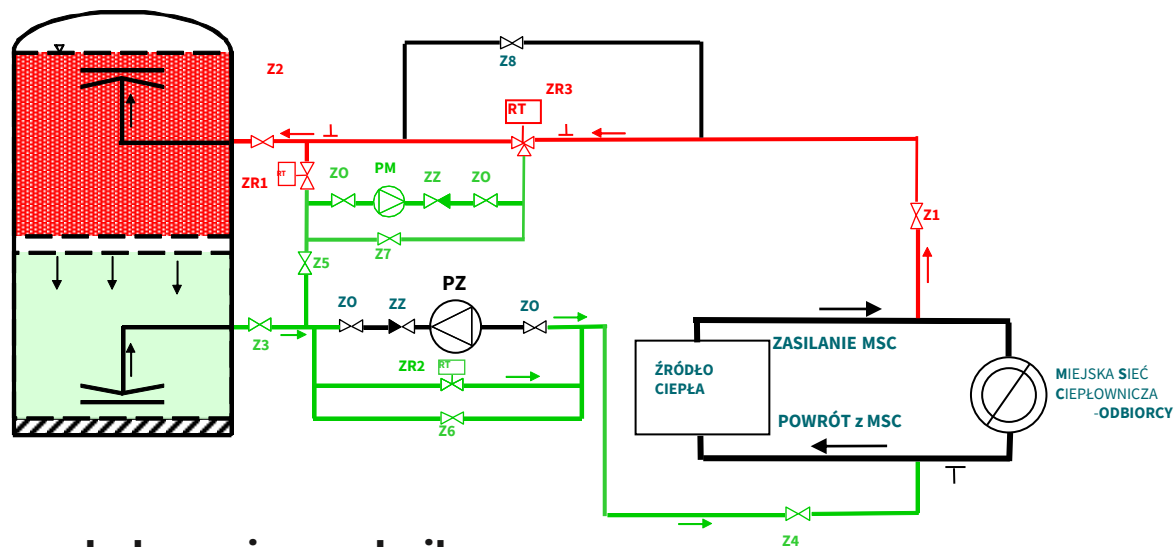


Schemat systemu ciepłowniczego z jednostką kogeneracyjną oraz z centralnym, bezcisnieniowym zasobnikiem ciepła (MTTES)





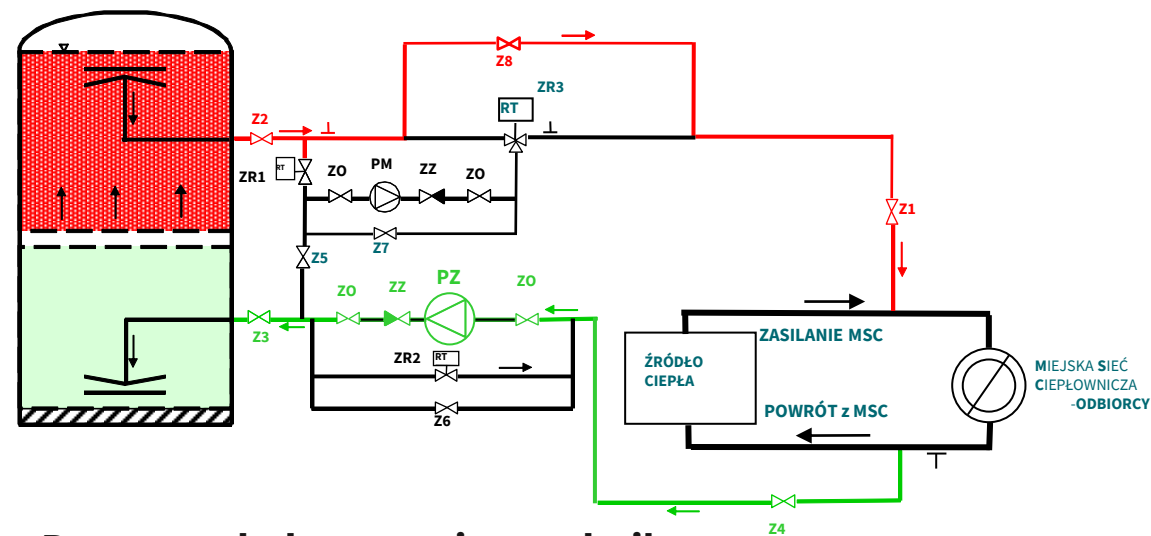
Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES



Proces ładowania zasobnika

Rozproszone zasobniki ciepła typu TTES czyli DTES (Distributed TTES)

*PZ – pompa zasobnika,
PM – pompa mieszająca, ZO
– zawór odcinający,
ZZ – zawór zwrotny,
ZR- zawór regulacyjny,
Z – zawór odcinający.*



Proces rozładowywania zasobnika



Zasadność stosowania zbiorników długoterminowych

- Zmniejszenie nierównomierności obciążenia bloku energetycznego,
- Zwiększenie stopnia skojarzenia,
- Zwiększenie stopnia elastyczności i sprawności całkowitej np. dla bloków spalających biomasę,
- Wzrost produkcji energii elektrycznej w godzinach wyższych cen sprzedaży,
- Możliwość wyeliminowania pracy kotłów szczytowych w okresach przejściowych,
- Zapewnienie dostawy ciepła w przypadku awarii bloku,
- Zapewnienie dłuższej żywotności pracujących urządzeń i zmniejszenie ich awaryjności poprzez zapewnienie stałego (niezmiennego) obciążenia urządzeń.



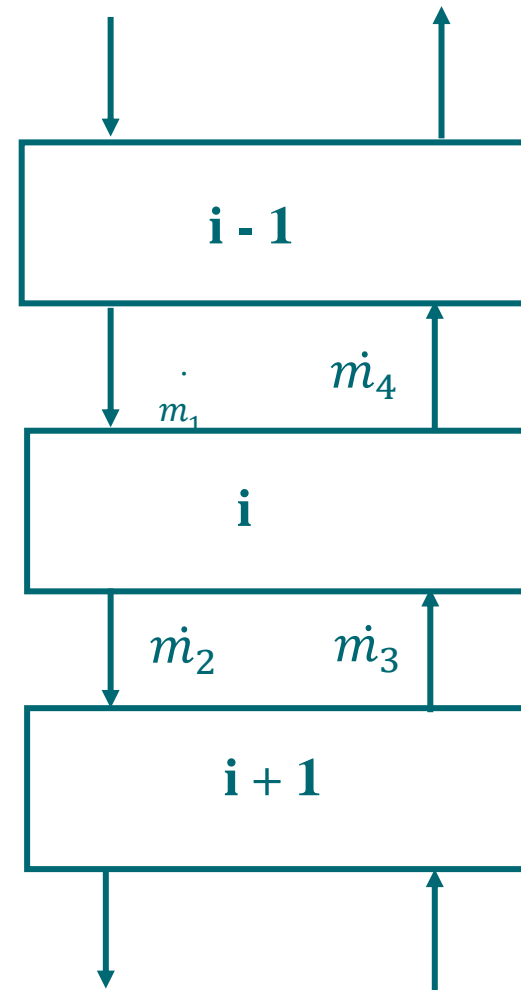
Zasadność stosowania zasobników rozproszonych

- Wzrost niezawodności systemu ciepłowniczego poprzez rozproszenie zasobników w sieci ciepłowniczej i tworzenie podsystemów z lokalnymi źródłami ciepła jakimi są zasobniki ciepła podczas procesu rozładowywania i dostawy ciepła do odbiorców;
- Stabilizacja obciążenia sieci ciepłowniczej magistralnej i dystrybucyjnej na odcinkach zasobniki-źródło;
- Możliwość integracji z systemem elektroenergetycznym – P2H poprzez dodatkowy montaż grzałek zasilanych energią elektryczną wewnątrz zbiorników;
- Możliwość sterowania obciążeniami sieci metodą jakościową, właściwy dobór temperatury wody zasilającej rejonu i wody powrotnej (na najniższym możliwym poziomie) przekłada się na zmniejszenie strat ciepła w sieci magistralnej i głównej dystrybucyjnej.

Przedmiotem rozważań jest jednowymiarowy model zasobnika.

Zasobnik jest dzielony na N warstw (węzłów) o grubości Δx każda ($\Delta x = \frac{H}{N}$).

Przyjęto założenie, że temperatura masy wody w węźle jest jednakowa.





Model oparty na bilansie energii w każdej warstwie zasobnika

$$C_w m_i \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{1,i} + \dot{Q}_{2,i} + \dot{Q}_{3,i} + \dot{Q}_{4,i} + \dot{Q}_{5,i}$$

gdzie:

$\dot{Q}_{1,i}$ - ciepło dostarczane z górnego węzła,

$\dot{Q}_{2,i}$ - ciepło dostarczane z dolnego węzła,

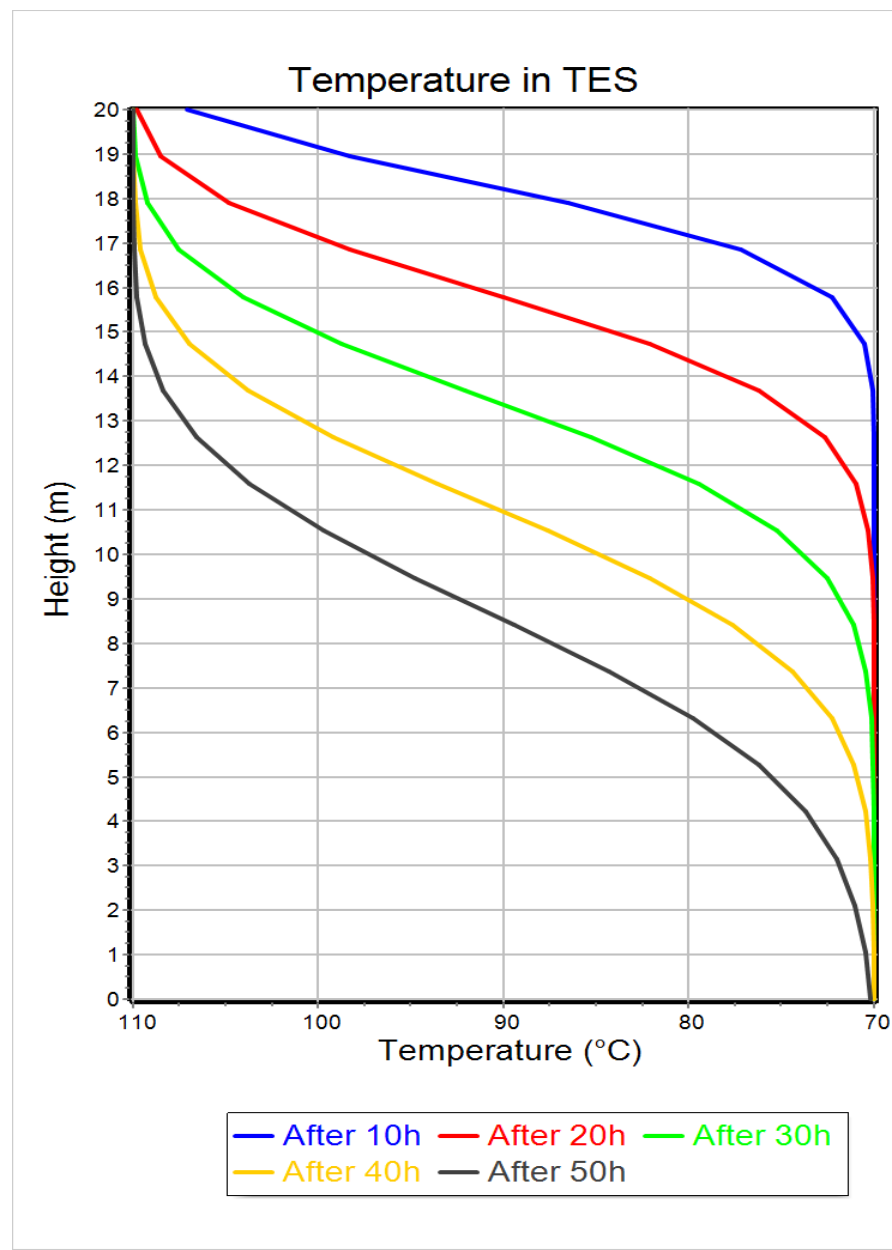
$\dot{Q}_{3,i}$ - ciepło dostarczane z zewnątrz,

$\dot{Q}_{4,i}$ - ciepło odbierane na zewnątrz,

$\dot{Q}_{5,i}$ - ciepło tracone przez ściankę zbiornika.



Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES





Model przewodzenia i konwekcji

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

gdzie:

v - prędkość przepływu $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\alpha = \frac{k}{c_p \rho}$ - dyfuzyjność cieplna $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

k - współczynnik przewodności cieplnej $\left[\frac{W}{mK}\right]$

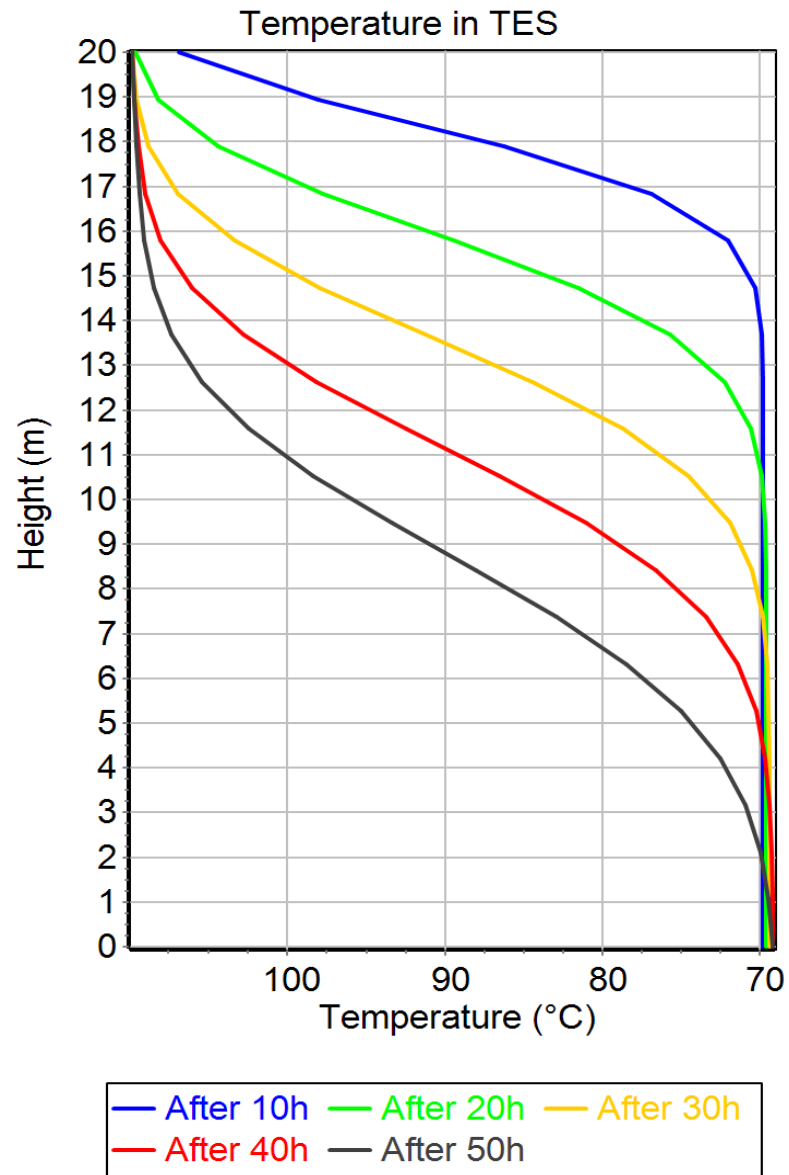
ρ - gęstość $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

c_p - ciepło właściwe $\left[\frac{J}{kgK}\right]$

T - temperatura [K].



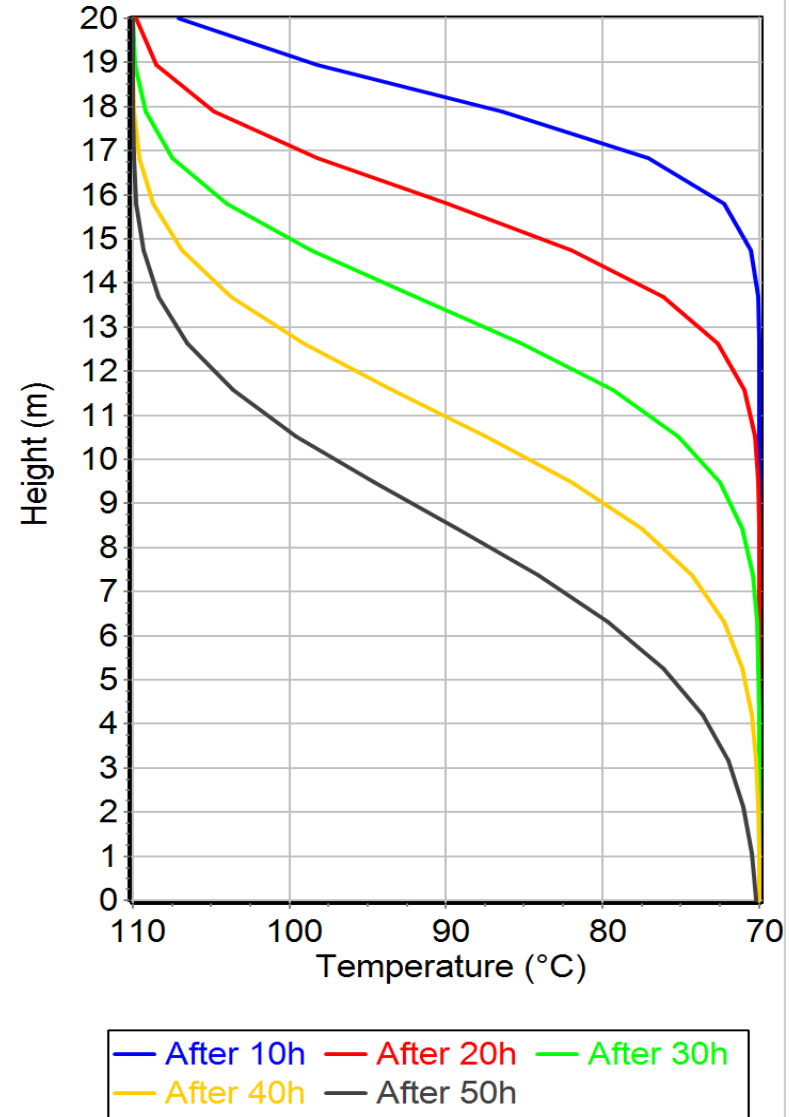
Analiza procesów magazynowania ciepła w zasobniku typu TES





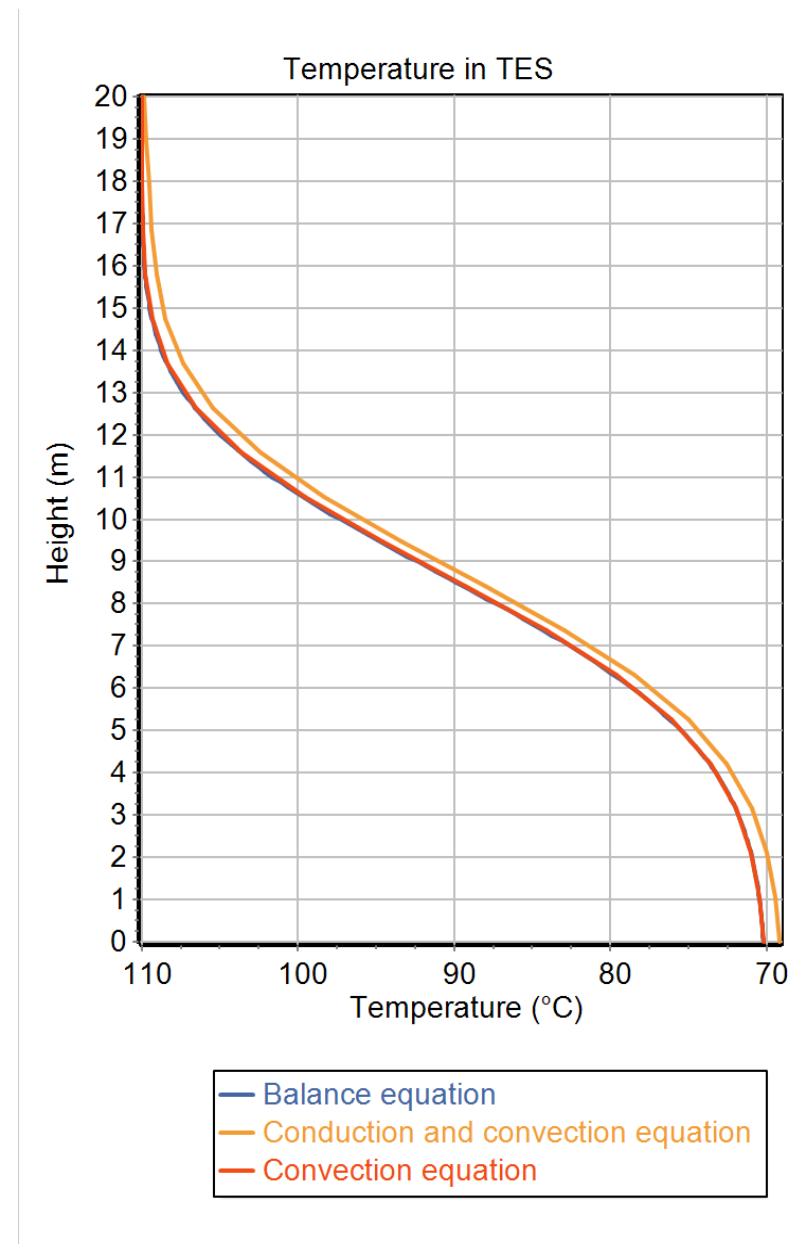
Model konwekcji

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$



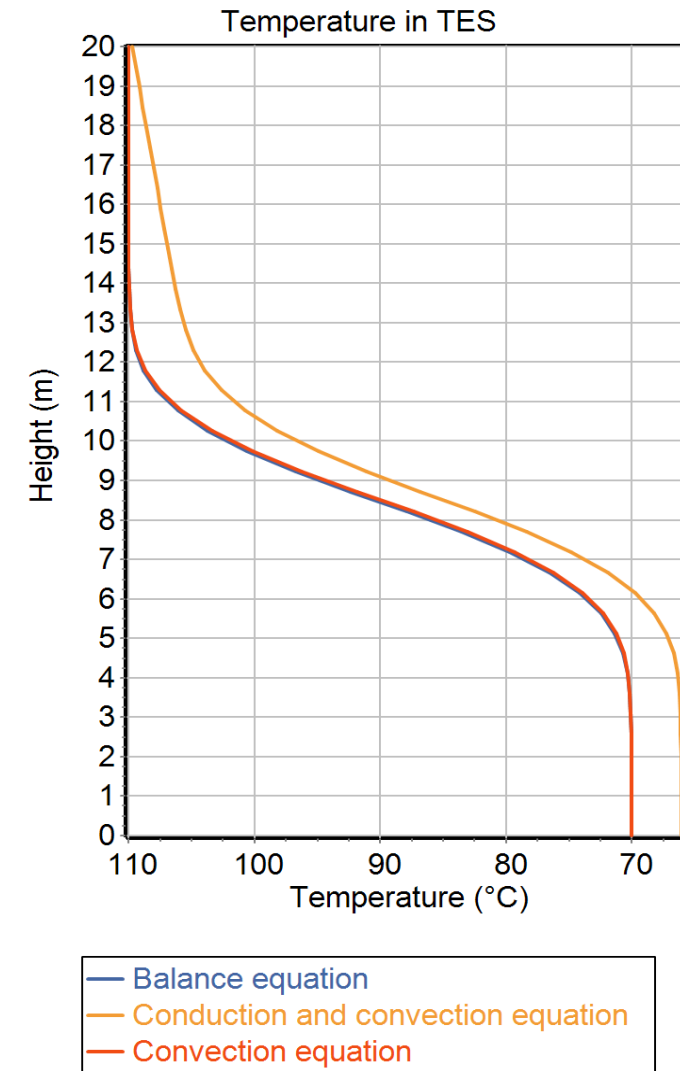


Analiza porównawcza modeli dla $N = 20$ węzłów



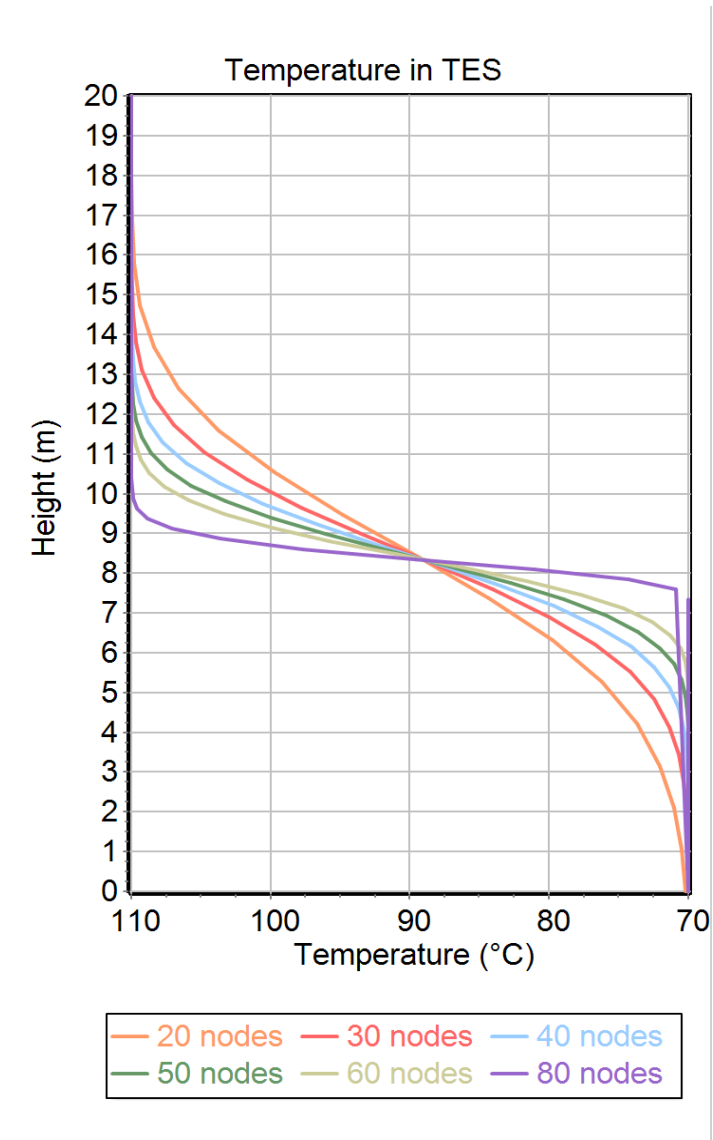


Analiza porównawcza modeli dla $N = 40$ węzłów



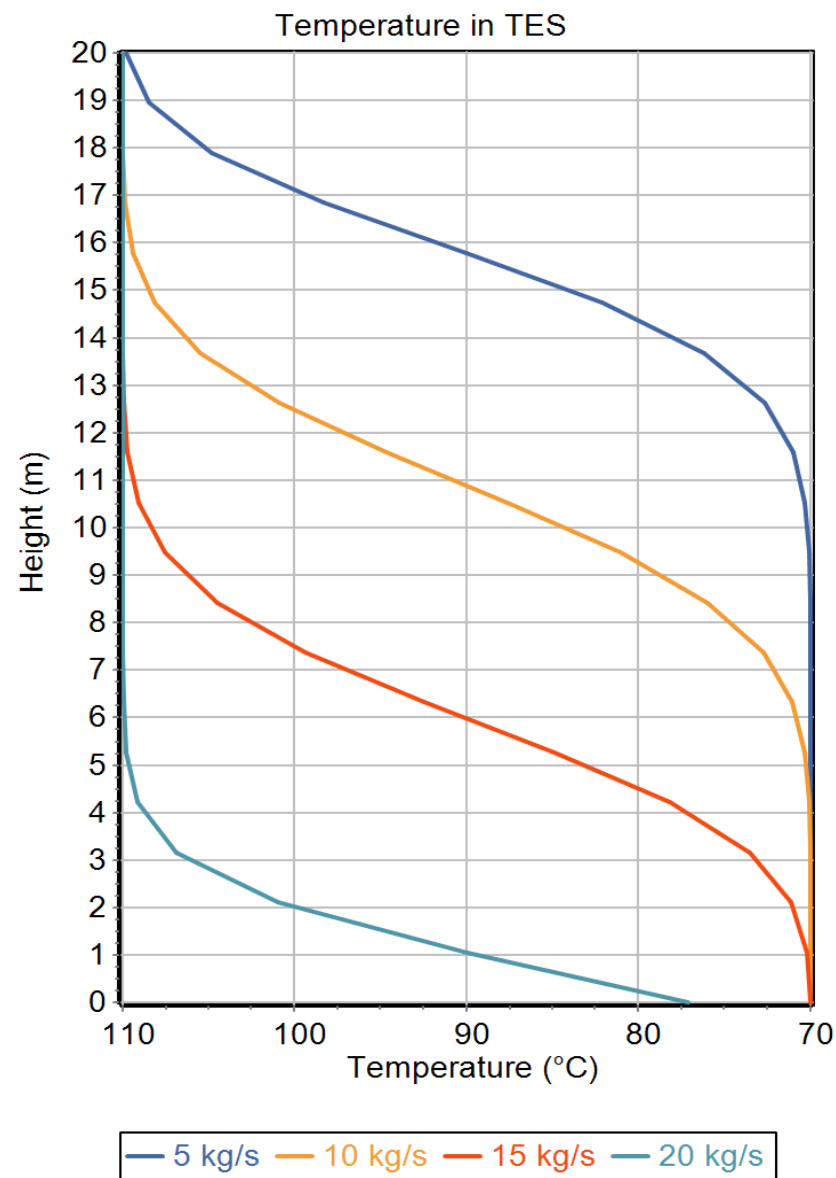


Wpływ liczby węzłów
na dokładność obliczeń





Wpływ natężenia przepływu wody gorącej dostarczanej do zasobnika na rozkład temperatury w zasobniku.





Dziękuję
za uwagę

Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz
andrzej.osiadacz@pw.edu.pl