

Politechnika Wrocławska
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

mgr inż. Marcin Klimczak

Racjonalizacja struktury węzłów ciepłowniczych

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
Doc. dr hab. inż. Jan Syposz

Wrocław 2006

Spis treści

1. Pojęcia ogólne :	4
2. Oznaczenia:	6
3. Wstęp.....	10
3.1 Węzły ciepłownicze.....	10
3.1.1 Wstęp.....	10
3.1.2 Priorytet ciepłej wody użytkowej.....	11
3.1.3 Węzeł jednostopniowy równoległy.....	12
3.1.4 Węzeł szeregowo równoległy.....	13
3.1.5 Węzeł pełnoszeregowy.....	14
3.1.6 Węzły z jednostopniowym wymiennikiem c.w.u. zasilanym szeregowo-równolegle wodą sieciową	15
3.2 Wymienniki ciepła.....	19
3.3 Temperatuty obliczeniowe instalacji centralnego ogrzewania a węzły ciepłownicze.....	20
3.4 Instalacje ciepłej wody użytkowej.....	20
3.5 Podsumowanie.....	22
4. Cel pracy.....	22
5. Teza.....	23
6. Model węzła ciepłowniczego.....	23
6.1 Założenia.....	23
6.2 Wykresy regulacyjne.....	24
6.2.1 Wykres regulacyjny wody sieciowej.....	24
6.2.2 Wykres regulacyjny wody instalacyjnej c.o.....	24
6.3 Ciepła woda użytkowa.....	25
6.4 Wymienniki ciepła.....	25
6.4.1 Wymienniki JAD.....	25
6.4.2 Wymienniki płytowe.....	25
6.5 Opis modelu symulacyjnego.....	29
6.5.1 Algorytmy obliczeń – przykłady.....	29
6.5.2 Program symulacyjny.....	33
7. Przykładowe symulacje pracy węzłów ciepłownicznych.....	38
7.1 Wpływ strumienia wody cyrkulacyjnej na pracę węzła ciepłowniczego na przykładzie węzła szeregowo-równoległego dla wielorodzinnego budynku mieszkalnego.....	38
7.1.1 Założenia.....	40
7.1.2 Zmienność strumieni wody cyrkulacyjnej przy zmiennych udziałach ciepłej wody użytkowej.....	42
7.1.3 Określenie strumieni wody sieciowej dla węzła ciepłowniczego przy różnych udziałach wody cyrkulacyjnej.....	45
7.1.4 Wnioski.....	51
7.2 Porównanie pracy węzłów równoległego i pierwszostopniowego dla domu jednorodzinnego	52
7.2.1 Założenia.....	52
7.2.2 Wyniki symulacji.....	53
7.3 Porównanie pracy węzłów ciepłownicznych o różnych konfiguracjach dla budynku wielorodzinnego.....	55
7.3.1 Założenia.....	55
7.3.2 Wyniki symulacji.....	58
8. Badania na obiekcie rzeczywistym.....	71
8.1 Opis stanowiska badawczego.....	71
8.1.1 Porównanie pracy węzłów Gliniana 75 i Gliniana 81.....	77

8.1.2 Analiza pracy węzła Gliniana 75.....	80
8.2 Algorytm sterowania.....	82
8.2.1 Węzeł pierwszostopniowy – wersja 1.....	83
8.2.2 Węzeł pierwszostopniowy – wersja 2.....	83
8.3 Wyniki badań.....	86
9.Niepewność pomiarów.....	98
9.1 Wstęp.....	98
9.2 Niepewność standardowa.....	98
9.3 Niepewność rozszerzona.....	99
9.4 Niepewności systematyczne i przypadkowe oraz błędy pomiarów.....	99
9.5 Niepewność pomiarów wykonanych w węźle ciepłowniczym Gliniana 75.....	100
9.5.1 Pomiary temperatur.....	100
9.5.2 Pomiary strumienia ciepłej wody użytkowej.....	101
9.5.3 Pomiary za pomocą ciepłomierzy.....	102
9.5.4 Niepewność pomiarów pośrednich.....	104
10.Wnioski.....	109

1.Pojęcia ogólne :

Sporządzono na podstawie Polskich Norm [1], [2] oraz Rozporządzenia [3]

1. Ciepłownictwo – dział techniki zajmujący się wytwarzaniem, przesyłaniem oraz wykorzystaniem ciepła.
2. Źródło ciepła- zespół urządzeń do wytwarzania ciepła.
3. Sieć ciepłownicza (cieplna) – sieć przewodów oraz urządzeń pomocniczych służących do przesyłania ciepła do węzłów ciepłowniczych.
4. System ciepłowniczy – zespół urządzeń, których zadaniem jest wytwarzanie, przesyłanie i przekazywanie ciepła do węzłów ciepłowniczych za pośrednictwem nośnika ciepła. System ciepłowniczy tworzą: źródła ciepła, sieć ciepłownicza oraz węzły ciepłownicze.
5. Nośnik ciepła (czynnik grzejny) – czynnik za pośrednictwem którego transportowane jest ciepło ze źródła ciepła do użytkowników. Najczęściej nośnikiem ciepła jest woda lub para wodna.
6. Moc cieplna źródła (urządzenia) – ilość ciepła wytwarzana lub przekazywana w jednostce czasu i określonych warunkach.
7. Wykres zapotrzebowania na moc cieplną (ciepła) – graficzne odwzorowanie funkcji obrazującej zmiany zapotrzebowania na moc cieplną (ciepła) w czasie (np. wykres roczny, wykres dobowy).
8. Elektrociepłownia – zespół urządzeń w których wytwarzane są, w układzie skojarzonym energia elektryczna i ciepło na potrzeby systemu ciepłowniczego.
9. Ciepłownia – zespół urządzeń do wytwarzania ciepła na potrzeby systemu ciepłowniczego.
10. Centralne ogrzewanie – ogrzewanie w którym ciepło potrzebne do ogrzewania zespołu pomieszczeń otrzymywane jest z jednego źródła ciepła i jest doprowadzane do ogrzewanych pomieszczeń za pomocą czynnika grzejnego.
11. Instalacja (centralnego) ogrzewania – zespół urządzeń, elementów i przewodów służących do:
 - wytwarzania czynnika grzejnego o wymaganej temperaturze i ciśnieniu lub przetwarzania tych parametrów (źródło ciepła),
 - doprowadzenia czynnika grzejnego do ogrzewanego obiektu (część zewnętrzna instalacji),
 - rozdziału i rozprowadzenia czynnika grzejnego w ogrzewanym budynku i przekazania ciepła w pomieszczeniach (część wewnętrzna instalacji).
12. Węzeł cieplny (ciepłowniczy) – zespół urządzeń służących do:

- przekazywania energii cieplnej,
 - przetwarzania temperatury i ciśnienia czynnika grzejącego,
 - pomiaru i regulacji tych parametrów oraz strumienia czynnika grzejącego,
 - ewentualnej rejestracji wymienionych wielkości,
 - zabezpieczenia instalacji przed niedopuszczalnym wzrostem ciśnienia i temperatury.
13. Woda instalacyjna – woda wypełniająca instalację centralnego ogrzewania.
14. Woda sieciowa – woda wypełniająca sieć ciepłowniczą dostarczającą dla wody instalacyjnej ciepło poprzez przetwarzanie parametrów w węźle cieplnym.
15. Obliczeniowa temperatura czynnika grzejącego na zasilaniu (zasilaniu) – najwyższa temperatura czynnika grzejącego, przyjęta do obliczeń instalacji w warunkach obliczeniowych temperatur powietrza na zewnątrz budynków zdefiniowanych w PN-82/B-02403 [4]).
16. Obliczeniowa temperatura czynnika grzejącego na powrocie – temperatura powrotnej wody instalacyjnej przyjęta do obliczeń instalacji w warunkach obliczeniowych temperatur powietrza na zewnątrz budynków zdefiniowanych w PN-82/B-02403 [4].
17. Węzeł cieplny (ciepłowniczy) indywidualny – węzeł cieplny zasilający bezpośrednio część wewnętrzną instalacji ogrzewania i zlokalizowany w tym samym budynku co instalacja.
18. Węzeł cieplny (ciepłowniczy) grupowy – węzeł cieplny zasilający instalację obejmującą więcej niż jeden obiekt (zawierający więcej niż jedna część wewnętrzną instalacji) poprzez część zewnętrzną instalacji.
19. Przedsiębiorstwo ciepłownicze – przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się wytwarzaniem ciepła we własnych źródłach oraz przesyłaniem i dystrybucją ciepła wytworzonego we własnych źródłach lub zakupionego od innego przedsiębiorstwa energetycznego.
20. Wytwórca ciepła – przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się wytwarzaniem ciepła.
21. Dystrybutor ciepła – przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się przesyłaniem i dystrybucją ciepła zakupionego od innego przedsiębiorstwa energetycznego.
22. Przedsiębiorstwo obrotu ciepłem – przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się wyłącznie handlem ciepłem.
23. Układ pomiarowo-rozliczeniowy – dopuszczony do stosowania, zgodnie z odrębnymi przepisami, zespół urządzeń służących do pomiaru ilości i parametrów nośnika ciepła, których wskazania stanowią podstawę do obliczenia należności z tytułu dostarczania ciepła.
24. Zamówiona moc cieplna – ustalona przez odbiorcę, największa moc cieplna, jaka w ciągu roku występuje w danym obiekcie dla warunków obliczeniowych, która zgodnie

z warunkami technicznymi oraz wymaganiami technologicznymi dla tego obiektu jest niezbędna do zapewnienia:

- a) pokrycia strat ciepła w celu utrzymania normatywnej temperatury i wymiany powietrza w pomieszczeniach,
- b) utrzymania normatywnej temperatury ciepłej wody w punktach czerpalnych,
- c) prawidłowej pracy innych urządzeń lub instalacji.

25. Warunki obliczeniowe:

- a) obliczeniowa temperatura powietrza atmosferycznego określona dla strefy klimatycznej, w której zlokalizowane są obiekty zaopatrywane w ciepło,
- b) normatywna temperatura ciepłej wody.

26. Obliczeniowy strumień (natężenie przepływu) nośnika ciepła – największy strumień (natężenie przepływu) nośnika ciepła, odpowiadający w przypadku:

- a) sieci ciepłowniczej – mocy cieplnej oddawanej ze źródła ciepła do tej sieci i parametrom nośnika ciepła dostarczanego z tego źródła ciepła, określonym w tabeli regulacyjnej dla warunków obliczeniowych,
- b) węzła cieplnego – zamówionej mocy cieplnej dla obiektu lub obiektów zasilanych z tego węzła cieplnego oraz parametrom nośnika ciepła dostarczanego do tego węzła, określonym w tabeli regulacyjnej dla warunków obliczeniowych,
- c) obiektu zasilanego z grupowego węzła cieplnego za pośrednictwem eksploatowanej przez przedsiębiorstwo energetyczne zewnętrznej instalacji odbiorczej – zamówionej mocy cieplnej dla potrzeb ogrzewania tego obiektu oraz parametrom wody dostarczanej z grupowego węzła cieplnego do instalacji centralnego ogrzewania, określonym dla warunków obliczeniowych na podstawie danych projektowych dla tej instalacji.

27. Tabela regulacyjna (wykres regulacyjny) – przedstawiona w postaci tabeli lub na wykresie zależność temperatury nośnika ciepła od warunków atmosferycznych.

28. Sezon grzewczy – okres, w którym warunki atmosferyczne powodują konieczność ciągłego dostarczania ciepła w celu ogrzewania obiektów.

2. Oznaczenia:

t_{zew} – temperatura zewnętrzna °C,

t_{zew}^{obl} – temperatura zewnętrzna obliczeniowa °C,

t_w – temperatura wewnętrzna °C,

T_z – temperatura zasilania wody sieciowej °C,

T_z^{obl} – temperatura obliczeniowa zasilania wody sieciowej °C,

T_p	– temperatura powrotu wody sieciowej °C,
T_p^{obl}	– temperatura obliczeniowa powrotu wody sieciowej °C,
t_z	– temperatura zasilania wody instalacyjnej °C,
t_z^{obl}	– temperatura obliczeniowa zasilania wody instalacyjnej °C,
t_p	– temperatura powrotu wody instalacyjnej °C,
t_p^{obl}	– temperatura obliczeniowa powrotu wody instalacyjnej °C,
t_{cw}	– temperatura ciepłej wody użytkowej °C,
t_{zw}	– temperatura zimnej wody °C,
t_c	– temperatura wody cyrkulacyjnej °C,
T_{11}	– temperatura wody grzewczej wchodzącej do wymiennika °C,
T_{12}	– temperatura wody grzewczej wychodzącej z wymiennika °C,
T_{21}	– temperatura wody ogrzewanej wchodzącej do wymiennika °C,
T_{22}	– temperatura wody ogrzewanej wychodzącej z wymiennika °C,
G_s	– strumień masy wody sieciowej kg/s,
$\dot{V}_s$	– strumień objętości wody sieciowej m ³ /h,
G_{SCO}	– strumień masy wody sieciowej na potrzeby centralnego ogrzewania kg/s ,
$\dot{V}_{SCO}$	– strumień objętości wody sieciowej na potrzeby centralnego ogrzewania m ³ /h ,
G_{SCW}	– dodatkowy strumień masy wody sieciowej na potrzeby ciepłej wody użytkowej kg/s,
$\dot{V}_{SCW}$	– dodatkowy strumień objętości wody sieciowej na potrzeby ciepłej wody użytkowej m ³ /h,
G_{CO}	– strumień masy wody instalacyjnej kg/s,
$\dot{V}_{CO}$	– strumień objętości wody instalacyjnej m ³ /h,
G_{CW}	– strumień masy ciepłej wody użytkowej kg/s,
$\dot{V}_{CW}$	– strumień objętości ciepłej wody użytkowej dm ³ /min,
G_c	– strumień masy wody cyrkulacyjnej kg/s,
$\dot{V}_c$	– strumień masy wody cyrkulacyjnej m ³ /h,
$\dot{m}_1$	– strumień masy wody przepływającej przez wymienniki po stronie pierwotnej kg/s
$\dot{m}_2$	– strumień masy wody przepływającej przez wymienniki po stronie wtórnej kg/s
Q_{CO}	– moc (zapotrzebowanie na ciepło) instalacji centralnego ogrzewania kW,
Q_{CO}^{OBL}	– obliczeniowa moc (obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło) instalacji centralnego ogrzewania kW,

Q_{CWU}	– moc (zapotrzebowanie na ciepło) instalacji ciepłej wody użytkowej kW,
Q_{CWU1}	– moc wymiennika I-go stopnia ciepłej wody użytkowej kW,
Q_{CWU2}	– moc wymiennika II-go stopnia ciepłej wody użytkowej kW,
ν	– lepkość kinematyczna m ² /s,
ρ	– gęstość wody kg/m ³ ,
m	– wykładnik potęgowy charakterystyki cieplnej grzejnika,
Nu	– liczba kryterialna Nusselta,
Re	– liczba kryterialna Reynoldsa,
Pr	– liczba kryterialna Prandtla,
Pr_f	– liczba kryterialna Prandtla dla temperatury płynu,
Pr_w	– liczba kryterialna Prandtla dla temperatury ścianki,
α	– współczynnik przejmowania ciepła W/m ² K,
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła W/mK,
$\lambda_{śc}$	– współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty wymiennika W/mK,
δ	– grubość płyty wymiennika m,
d_e	– średnica hydrauliczna m,
k	– współczynnik przenikania ciepła W/m ² K,
c	– współczynnik wykorzystany do aproksymacji współczynnika przenikania ciepła k,
a_1	– współczynnik wykorzystany do aproksymacji współczynnika przenikania ciepła k zależny od strumienia wody grzewczej,
a_2	– współczynnik wykorzystany do aproksymacji współczynnika przenikania ciepła k zależny od strumienia wody ogrzewanej,
A_{wym}	– powierzchnia wymiany ciepła wymiennika m ² ,
ZR_{co}	– zawór regulacyjny centralnego ogrzewania,
ZR_{co2}	– dodatkowy zawór regulacyjny centralnego ogrzewania,
ZR_{cw}	– zawór regulacyjny ciepłej wody użytkowej,
ZR_{cw2}	– dodatkowy zawór regulacyjny ciepłej wody użytkowej,
PO	– pompa obiegowa centralnego ogrzewania,
PC	– pompa cyrkulacyjna,
Indeksy:	
$_co$	– dotyczy instalacji lub wymiennika centralnego ogrzewania,
$_CWU$	– dotyczy instalacji lub wymiennika ciepłej wody użytkowej,
$_CWU1$	– dotyczy wymiennika ciepłej wody użytkowej I-go stopnia,

_CWU2 – dotyczy wymiennika ciepłej wody użytkowej II-go stopnia.

3.Wstęp

Przedsiębiorstwa ciepłownicze, aby być konkurencyjne muszą swój zakres usług dostosować do wymagań klienta. Większość odbiorców korzystających w Polsce z systemów ciepłowniczych to szeroko rozumiane budownictwo jedno i wielorodzinne (około 55-60% odbiorców).

Podstawowym zadaniem zasilania obiektów mieszkalnych w ciepło jest zapewnienie dostawy ciepła zarówno na potrzeby centralnego ogrzewania jak i ciepłej wody użytkowej.

Ze względu na powstającą w dużym tempie konkurencję w postaci gazowych kotłowni lokalnych bądź indywidualnych firmy ciepłownicze zmieniają w ostatnich latach strukturę dostawy ciepła. Pomimo dużych zysków płynących z grupowania odbiorców (mniejsze koszty inwestycyjne i eksploatacyjne) przedsiębiorstwa ciepłownicze najczęściej decydują się na stosowanie coraz mniejszych węzłów ciepłowniczych, które dostosowane są do wymagań klienta. Ze względu na ogólną tendencję do tworzenia coraz mniejszych grup odbiorców (np. rozpadanie się spółdzielni mieszkaniowych na małe wspólnoty mieszkaniowe) powstające lub modernizowane węzły ciepłownicze coraz częściej zasilają pojedyncze obiekty (budynki wielorodzinne) lub też ich części (np. wydzielone "klatki schodowe"). W nowych budynkach coraz częściej stosowane też są węzły mieszkaniowe indywidualne (mieszkaniowe stacje wymiennikowe). Pomimo stosunkowo dużych kosztów inwestycyjnych przedsiębiorstwa ciepłownicze zabiegają również o rozproszonych klientów indywidualnych (właścicieli domów jednorodzinnych).

Takie zmniejszenie wielkości odbiorów ciepła jest spowodowane chęcią uniezależnienia dostawy ciepła od pozostałych użytkowników i unikania ponoszenia (a przede wszystkim rozliczania) wspólnych kosztów razem z innymi użytkownikami.

3.1 Węzły ciepłownicze

3.1.1 Wstęp

Ze względu na sposób dostarczenia czynnika grzejącego węzły dzielimy na pośrednie (zmiana parametrów za pośrednictwem wymienników ciepła) i bezpośrednie (do instalacji wewnętrznej dostarczany jest czynnik bezpośrednio z sieci ciepłowniczej przy jednoczesnej zmianie jego temperatury i ciśnienia).

W przypadku układów przygotowania ciepłej wody użytkowej obecnie stosowane są wyłącznie połączenia pośrednie, w przypadku układów przygotowania centralnego ogrzewania najczęściej stosowane są połączenia pośrednie.

Ze względu na zastosowanie urządzeń do przygotowywania i magazynowania ciepłej wody użytkowej węzły możemy podzielić na zasobnikowe i bezzasobnikowe.

Obecnie ze względu na kłopoty eksploatacyjne firmy ciepłownicze rezygnują najczęściej z zastosowania w węzłach ciepłowniczych zasobników c.w.u. Związane jest to między innymi ze zwiększonym zagrożeniem wystąpienia w obrębie zasobnika zakażenia bakteriami legionella pneumophila, szczególnie przy utrzymywaniu niższych temperatur w układzie c.w.u. (J. Wollerstrandt [5])

W niniejszym opracowaniu Autor skupił się wyłącznie na węzłach ciepłowniczych pośrednich dwufunkcyjnych bezzasobnikowych.

Ze względu na specyfikę pracy węzłów ciepłowniczych należy zwrócić uwagę na to, iż wszelkie zmiany parametrów czynnika (strumienia, temperatury oraz ciśnienia) po jednej stronie węzła powodują zmiany parametrów czynnika grzewczego po jego drugiej stronie.

Węzeł ciepłowniczy jest tylko jednym z elementów systemu ciepłowniczego. Jego praca musi być analizowana w sposób umożliwiający określenie jego wpływu na cały system ciepłowniczy.

3.1.2 Priorytet ciepłej wody użytkowej

W węzłach ciepłowniczych strumień wody sieciowej dostarczony do węzła można zdefiniować jako :

$$G_s = G_{sco} + G_{scw} \quad (3.1)$$

Istnieją dwa podstawowe sposoby zmniejszenia maksymalnego strumienia wody sieciowej nie wpływające na jakość dostawy c.w.u. Pierwszym jest zastosowanie w układzie zasobnika ciepłej wody użytkowej który ma za zadanie ograniczyć chwilową dostawę ciepła do układu c.w.u. poprzez akumulację ciepłej wody użytkowej. Sposób doboru oraz wytyczne do projektowania węzłów ciepłowniczych z zasobnikami ciepłej wody użytkowej można znaleźć między innymi w książce S. Mańkowskiego [6]. Drugim sposobem jest zastosowanie priorytetu ciepłej wody użytkowej polegającego na czasowym ograniczeniu dostawy ciepła do układu c.o. przy zapewnieniu dostawy ciepła na potrzeby c.w.u. Wysokość (głębokość) priorytetu c.w.u. uzależniona jest między innymi od pojemności cieplnej budynku, izolacyjności przegród zewnętrznych, strumienia powietrza wentylującego, aktualnej temperatury zewnętrznej oraz charakteru i długości trwania rozbioru c.w.u. W przypadku obiektów o niewielkiej liczbie osób i stosunkowo krótkim czasie trwania rozbioru c.w.u. (np. dom jednorodzinny) wysokość priorytetu może wynosić 100% (brak dostawy ciepła na c.o. przy poborze c.w.u.).

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na to, iż w przypadku węzłów ciepłowniczych istnieją dwa sposoby realizacji priorytetu ciepłej wody użytkowej. Pierwszy polega na zastosowaniu układu szeregowego ciepłej wody użytkowej (np. w węźle pełnoszeregowym) w wyniku którego zmienia się temperatura dostawy ciepła na c.o. (bez zmiany jego strumienia) oraz drugi polegający na ograniczeniu strumienia wody sieciowej na potrzeby c.o. W pierwszym przypadku węzeł posiada

inherentny priorytet ciepłej wody użytkowej, nie wymuszony działaniem sprzężonej automatyki dostawy ciepła do c.o. i c.w.u. (stąd między innymi zalecenia stosowania węzłów ciepłowniczych pełnoszeregowych w budownictwie mieszkaniowym w latach 70-tych i 80-tych (S. Mańkowski [6]). W przypadku węzłów równoległych i szeregowo-równoległych zastosowanie priorytetu ciepłej wody użytkowej wymaga sprzężenia ze sobą dwóch obiegów regulacyjnych (c.o. i c.w.u.)

Ograniczenie strumienia wody sieciowej w węzłach ciepłowniczych wpływa na koszt dostawy ciepła zarówno po stronie dostawcy ciepła (możliwość zmniejszenia kosztów inwestycyjnych – koszt sieci ciepłowniczej jak i eksploatacyjnych – koszt wytwarzania lub zakupu ciepła, koszt pompowania) jak i jego odbiorcy (zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych wynikających ze zmniejszenia mocy zamówionej).

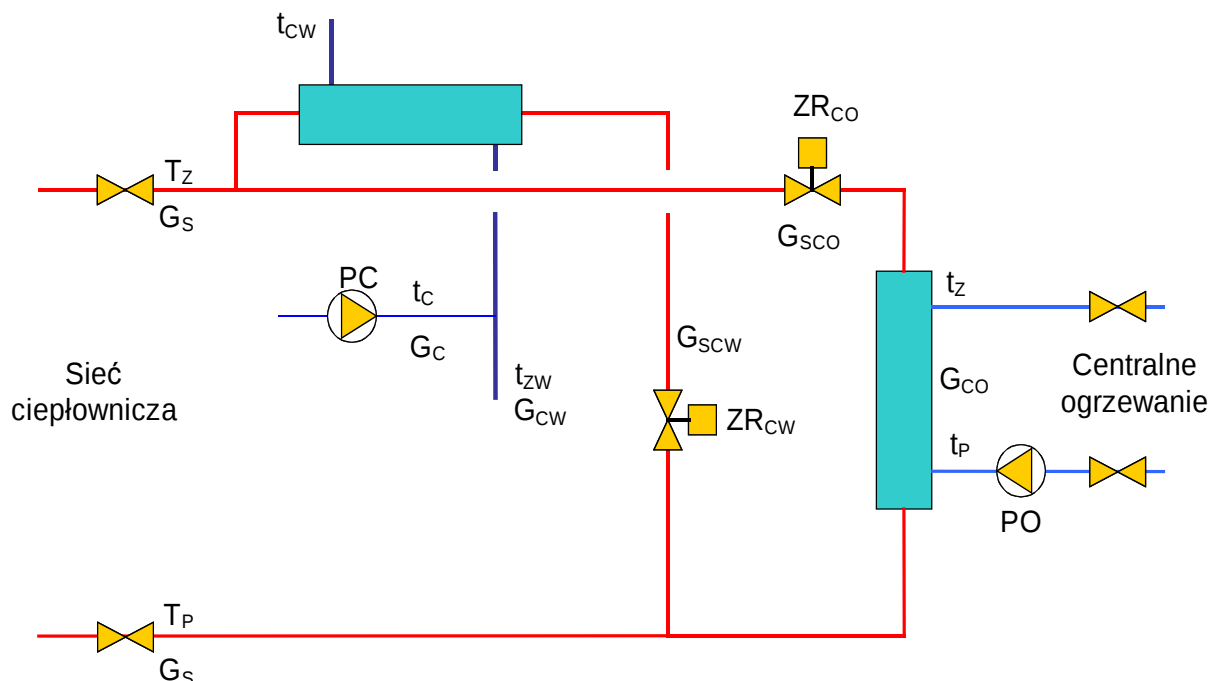
3.1.3 Węzeł jednostopniowy równoległy

Węzeł jednostopniowy równoległy jest węzłem z wymiennikiem ciepła do przygotowania ciepłej wody użytkowej, którego zasilanie włączone jest do przewodu zasilającego, a powrót – do przewodu powrotnego sieci ciepłowniczej (Polska Norma [7]).

Węzeł jednostopniowy równoległy ze względu na swoją prostą konstrukcję jest najtańszym inwestycyjnie węzłem ciepłowniczym. Schemat ideowy węzła umieszczono na rysunku 1.

Możliwość stosowania węzła równoległego jest zwykle ściśle ograniczona. We wrocławskim systemie ciepłowniczym (M. Zezula [8]) stosowanie węzła ograniczone jest do mocy cieplnej 70 kW lub też udziału ciepłej wody użytkowej poniżej 25% oraz powyżej 150%. Dla porównania w Finlandii (A. Pancewicz [9]) stosowanie węzłów równoległych ograniczone jest do zapotrzebowania na c.w.u. w wysokości 120kW (lub 6 mieszkańców). Przy zapotrzebowaniu w zakresie 120-220kW należy sprawdzić temperaturę wody sieciowej powracającej z c.o. - warunkiem dopuszczenia zastosowania węzła równoległego jest temperatura poniżej 45°C. Węzeł należy stosować również w przypadku, kiedy zapotrzebowanie na c.o. jest poniżej 30 kW lub też długość rozbiórów c.w.u. jest na tyle mała, że nie poprawia to schłodzenia wody sieciowej wychodzącej z węzła.

Ograniczenia stosowania węzła spowodowane są wyższymi w porównaniu z węzłami dwustopniowymi temperaturami wody powracającej do sieci ciepłowniczej, a co za tym idzie większymi przepływami wody sieciowej przez węzeł. Związane jest to bezpośrednio zarówno ze zwiększonymi kosztami inwestycyjnymi sieci ciepłowniczych (wymagana większa przepustowość) jak i eksploatacyjnymi (większe koszty pompowania i straty ciepła).



Rysunek 1: Schemat ideowy węzła jednostopniowego równoległego

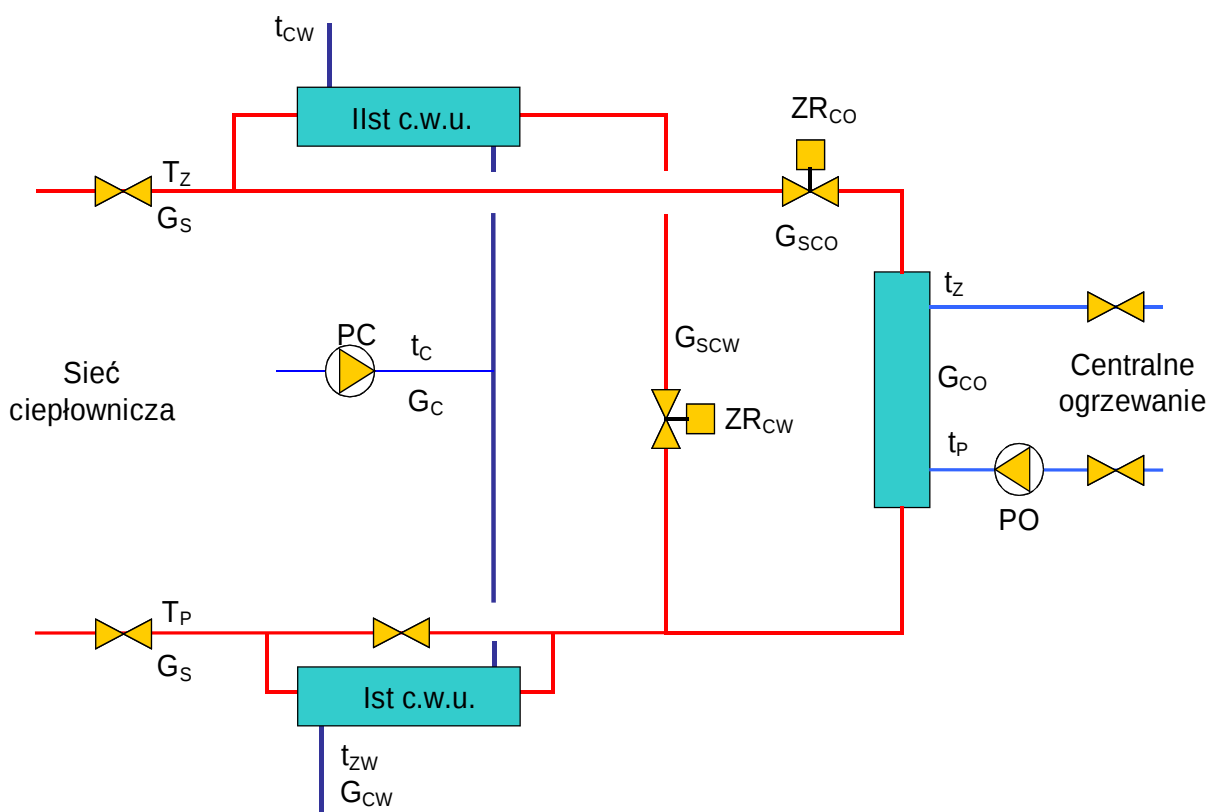
W przypadku sieci ciepłowniczych, których źródłem ciepła są elektrociepłownie podwyższenie temperatury powrotu zmniejsza sprawność wytwarzania energii elektrycznej.

Obecnie wszystkie węzły równoległe projektuje się jako węzły z funkcją priorytetu ciepłej wody użytkowej. Wytyczne do projektowania węzłów równoległych można znaleźć między innymi w opracowaniach: M. Zezula [8], E. Szczechowiak, B. Świątek, T. Wilczak [10], W. Wasilewski [11], W. Szaflik [12], W. Szaflik [13].

Ze względu na dynamiczny charakter zmian przepływów ciepłej wody użytkowej w przypadku węzła równoległego wymagane jest stosowanie siłowników zaworów regulacyjnych o bardzo małych stałych czasowych. Brak możliwości łagodzenia zmian przepływu w węzłach bezzasobnikowych (pomimo zastosowania priorytetu c.w.u.) powoduje szybsze niż w pozostałych typach węzłów ciepłowniczych zużycie siłowników oraz konieczność liczenia się z chwilowymi wahaniami temperatury c.w.u.

3.1.4 Węzeł szeregowo równoległy

Węzeł szeregowo-równoległy jest obecnie najbardziej popularnym węzłem ciepłowniczym w Polsce. Ze względu na zastosowanie drugiego wymiennika (tzw. I-go stopnia) węzeł szeregowo – równoległy (schemat ideowy węzła – rysunek 2) umożliwia zmniejszenie ilości wody sieciowej płynącej w systemie ciepłowniczym poprzez wykorzystanie ciepła wody powracającej z instalacji c.o. do podgrzania ciepłej wody użytkowej.



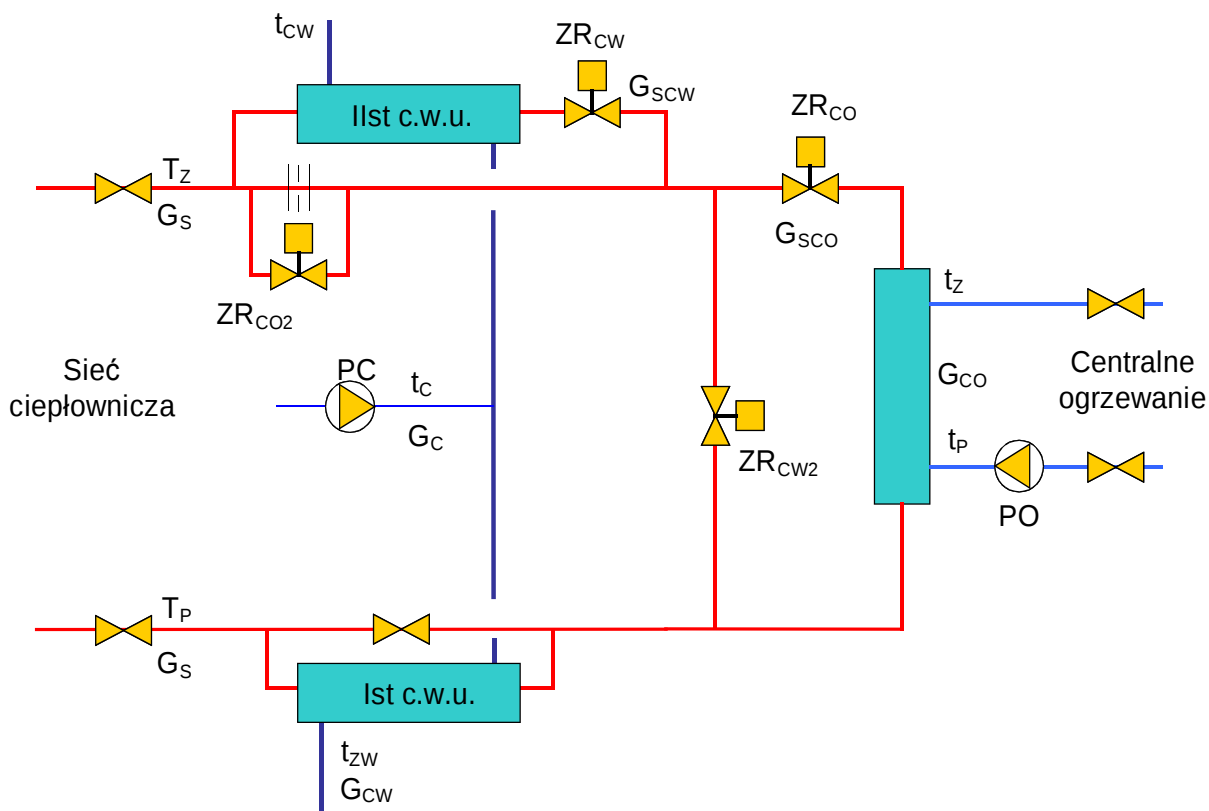
Rysunek 2: Schemat ideowy węzła szeregowo-równoległego

Węzeł taki jest inwestycyjnie droższy (koszt dodatkowego wymiennika), ale ze względu na wymagany mniejszy obliczeniowy strumień wody sieciowej oraz niższe temperatury powrotu (w trakcie poboru c.w.u.) eksploatacyjnie jest tańszy. Zastosowanie dodatkowego stopnia podgrzewu c.w.u. zmniejsza również wahania temperatury c.w.u. oraz wydłuża czas eksploatacji siłowników zaworów regulacyjnych. Wytyczne do projektowania węzłów szeregowo-równoległych można znaleźć między innymi w publikacjach: S. Mańkowski [6], M. Zezula [8], E. Szczechowiak, B. Świątek, T. Wilczak [10].

3.1.5 Węzeł pełnoszeregowy

Najbardziej dopracowaną wersją węzła pełnoszeregowego jest węzeł pełnoszeregowy pracujący okresowo jako szeregowo równoległy pomysłu R. Śnieżyka. Dokładną specyfikację węzła oraz wyniki jego badań można znaleźć w pracy M. Fijewskiego [14]. Schemat węzła przedstawiono na rys. 3. Węzeł pełnoszeregowy charakteryzuje się najmniejszą zmiennością strumienia wody sieciowej. Jest to szczególnie ważne w przypadku dużych węzłów grupowych które są usytuowane w pobliżu znacznie mniejszych węzłów. Małe wahania strumienia wody sieciowej powodują

mnijšie zakłócenia w dostawie ciepła do pozostałych węzłów.



Rysunek 3: Węzeł pełnoszeregowy okresowo szeregowo-równoległy

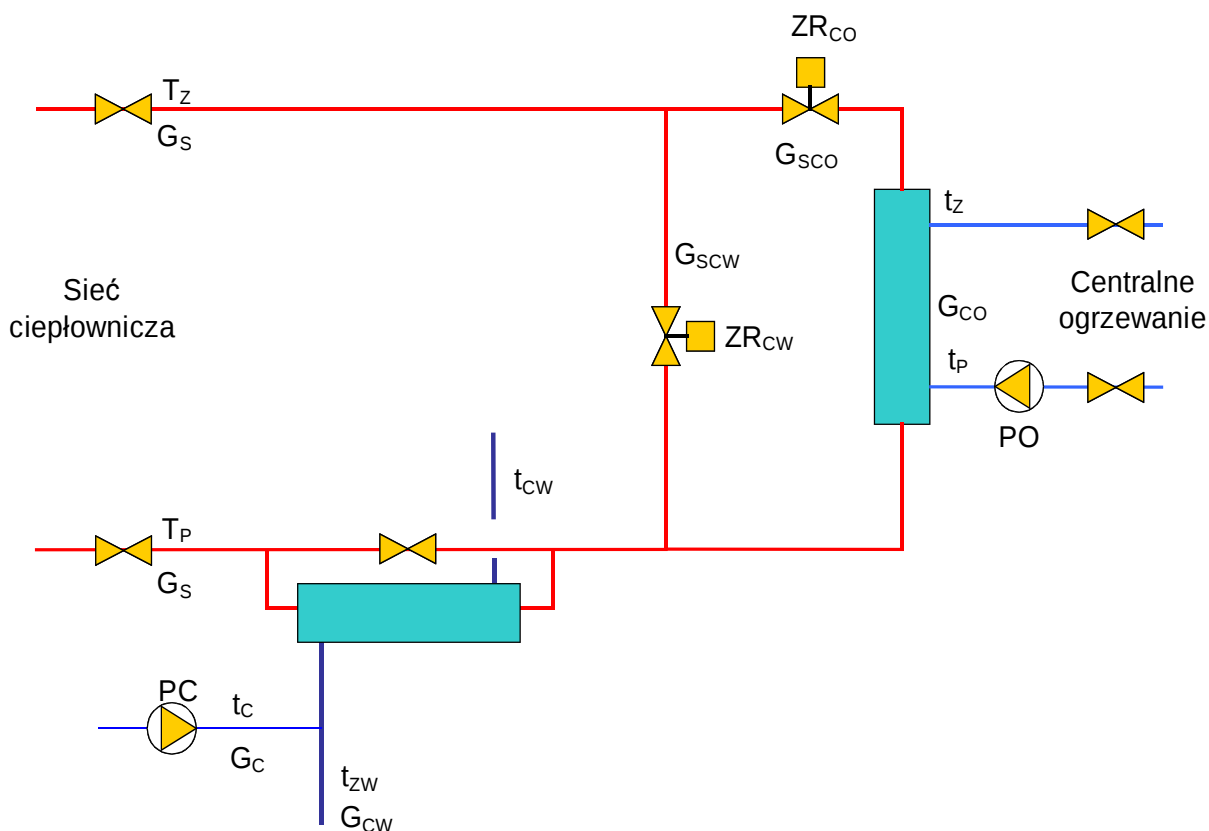
Ze względu na kosztowny układ automatycznej regulacji (wymagane cztery zawory regulacyjne) układ ten stosowany jest obecnie stosunkowo rzadko i tylko w przypadku dużych węzłów grupowych.

3.1.6 Węzły z jednostopniowym wymiennikiem c.w.u. zasilanym szeregowo-równolegle wodą sieciową

Istnieje możliwość zastosowania w ciepłownictwie węzłów z jednostopniowym wymiennikiem c.w.u. zasilanym szeregowo-równolegle wodą sieciową, które są węzłami o charakterze pośrednim pomiędzy dwustopniowymi węzłami szeregowo równoległymi i jednostopniowymi równoległymi. Ze względu na trudności redakcyjne w wykorzystaniu w pracy prawidłowej nazwy węzła ciepłowniczego (węzeł z jednostopniowym wymiennikiem c.w.u. zasilanym szeregowo-równolegle wodą sieciową) zdecydowano się na stosowanie w niniejszym opracowaniu nazwy stosowanej na własny użytek przez Autora – węzeł „pierwszostopniowy”.

Przedstawiony na rysunku 4 węzeł jest odwróconą wersją węzła jednostopniowego równoległego. Ze względu na to, iż wymiennik ciepłej wody użytkowej znajduje się za

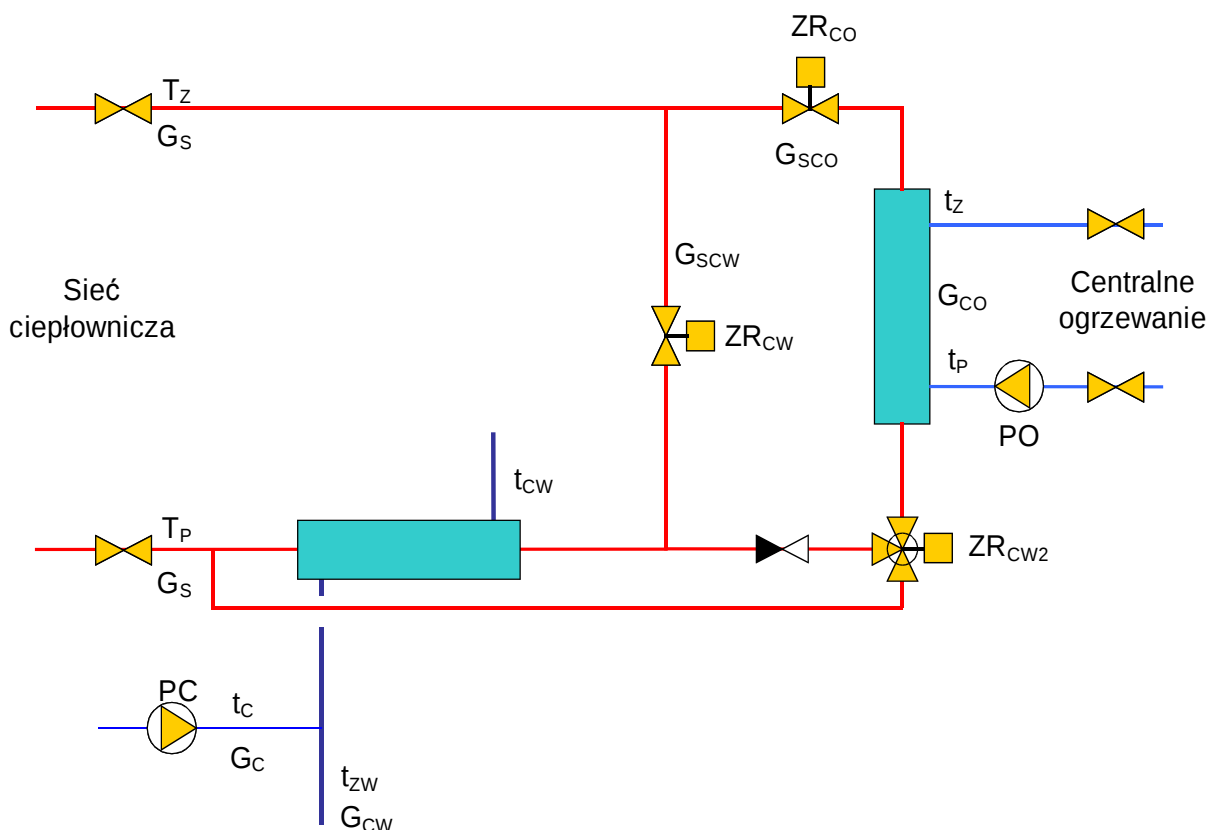
wymiennikiem c.o. istnieje możliwość dodatkowego dochłodzenia wody sieciowej powracającej z węzła. Ze względu na stosunkowo małą różnicę temperatur pomiędzy wodą siecią zasilającą węzeł a wodą siecią powracającą z wymiennika c.o. w okresie przejściowym przy małym udziale ciepłej wody użytkowej wymagany jest duży dodatkowy strumień wody sieciowej, aby osiągnąć odpowiednią temperaturę wody sieciowej przed wymiennikiem c.w.u. potrzebną do uzyskania wymaganej temperatury ciepłej wody użytkowej.



Rysunek 4: Schemat ideowy "węzła pierwszostopniowego" wersja 1

Przedstawione poniżej węzły dzięki zastosowaniu dodatkowego zaworu regulacyjnego ZR_{CW2} (trójdrogowego rozdzielającego rysunek 5 oraz przelotowego rysunek 6) umożliwiają zarówno zmniejszenie ilości wody sieciowej w okresie przejściowym (w porównaniu do poprzedniej wersji węzła) jak i zapobiegają przegrzewaniu ciepłej wody użytkowej przy niskich temperaturach zewnętrznych, które może mieć miejsce w węzłach dwustopniowych bez dodatkowego układu regulacji wymiennika pierwszego stopnia. Są one jednak inwestycyjnie droższe od poprzedniej wersji – koszt dodatkowego układu regulacji.

W sytuacji, gdy cała woda sieciowa powracająca z wymiennika c.o. zostanie skierowana przez obejście wymiennika c.w.u. węzeł będzie węzłem okresowo równoległym (tylko przy zastosowaniu zaworu trójdrogowego).



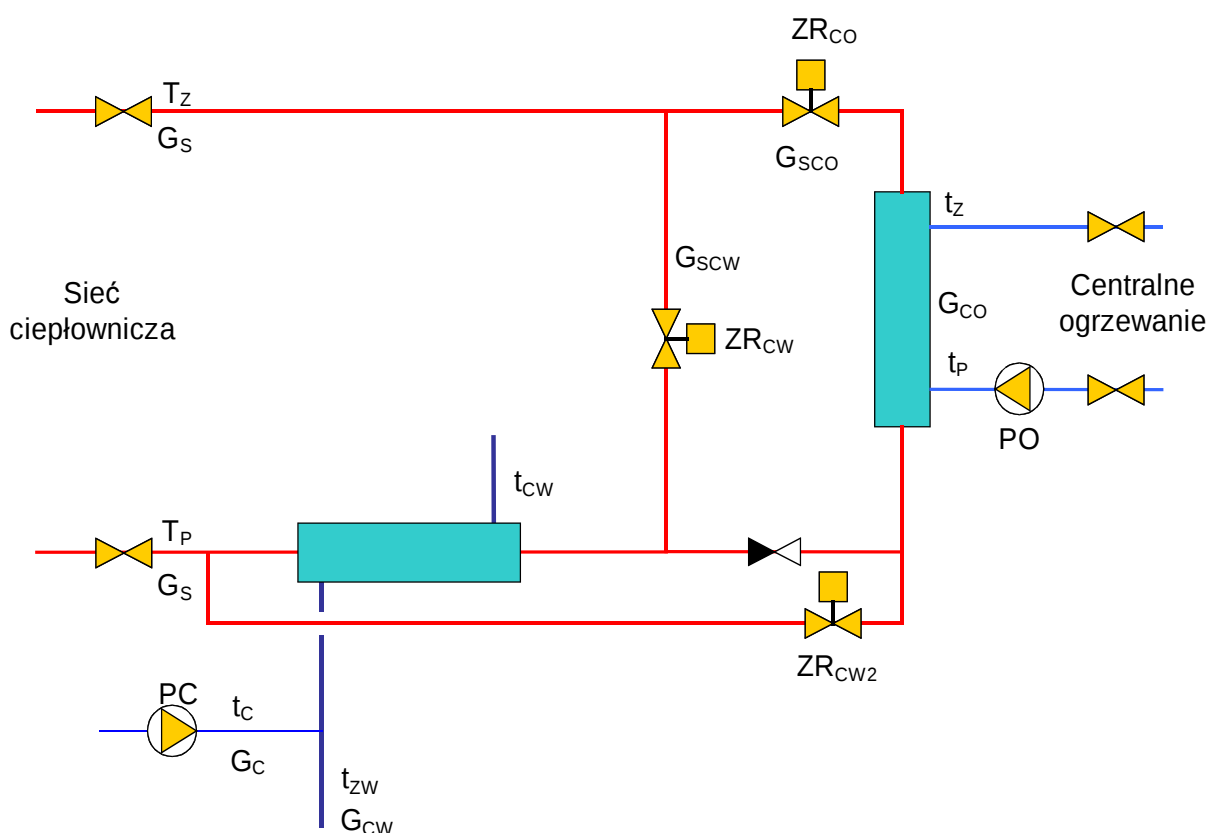
Rysunek 5: Wzłaz "pierwzostopniowy" wersja2 z dodatkowym zaworem trójdrogowym rozdzielającym

Wzłazy o układach przedstawionych powyżej w literaturze są bardzo słabo opisane. Wzmiankę o węźle (wersja 1) można znaleźć w publikacji E. Szczechowiak, B. Świątek, T. Wilczak [10]. Rozwiązanie węzła podane jest jako jedna z możliwości ograniczenia wytrącania się kamienia z wody wodociągowej o dużej twardości w wymiennikach c.w.u. (ograniczenie temperatury na zasilaniu wymiennika do wartości 70-80°C). Dzięki takiemu rozwiązaniu można uniknąć stosowania wymienników rozbieralnych umożliwiając częste czyszczenie powierzchni wymiennika (wymienniki płytowe) co znacząco może obniżyć koszty inwestycyjne szczególnie w małych i średnich węzłach ciepłowniczych. Należy również zwrócić uwagę że opisywany węzeł charakteryzuje się małą zmiennością przepływu wody sieciowej przez wymiennik c.w.u. co gwarantuje stabilną wymianę ciepła po stronie wody sieciowej. Obydwa przedstawione typy węzłów ciepłowniczych ze względu na pośredni dopływ wody sieciowej do układu podgrzewania c.w.u. powinny charakteryzować się zmniejszonymi chwilowymi wahaniami przepływów wody sieciowej w porównaniu do węzła jednostopniowego równoległego jak i dwustopniowego szeregowo - równoległego. Zmniejszenie wahań przepływów wody sieciowej związane jest bezpośrednio ze wydłużeniem czasu pracy (żywołności) armatury regulacyjnej (w szczególności

zaworów regulacyjnych i ich siłowników) a co za tym idzie zmniejszeniem kosztów remontów i zwiększeniem niezawodności pracy węzłów ciepłowniczych.

Zastosowanie tego typu węzłów powinno być szczególnie opłacalne przy dużym obliczeniowym udziale c.w.u. Węzeł w wersji 1 może również stanowić alternatywę dla węzłów jednostopniowych równoległych.

Układ węzła ciepłowego o powyższej konstrukcji został opatentowany przez J. Krysiaka (Patent [15]). Patent wygasł w 1996 roku. W stosunku do oryginalnego rozwiązania węzła w wersji 2-giej w celu uniknięcia możliwości przepływu wody sieciowej przez zawory ZR_{CW} i ZR_{CW2} z pominięciem wymiennika c.w.u. zastosowano zawór zwrotny.



Rysunek 6: Węzeł "pierwszostopniowy" w wersji 2 z dodatkowym zaworem regulacyjnym przelotowym

Na podstawie nieoficjalnych informacji uzyskanych przez Autora wiele firm eksperymentowało z tego typu węzłami ciepłowniczymi (między innymi APV, ETX), ale żadne wyniki prac nie zostały opublikowane.

3.2 Wymienniki ciepła

Aktualnie w Polsce najczęściej stosuje się dwa typy wymienników ciepła: wymienniki płaszczowo-rurowe o mocno rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła (najczęściej typu JAD) oraz wymienniki płytowe. Oba typy wymienników charakteryzują się zwartą budową i wysokimi współczynnikami przenikania ciepła.

Ze względu na różne powierzchnie przepływu w wymiennikach typu JAD po stronie wody sieciowej i instalacyjnej wymienniki te bardzo dobrze sprawują się w przypadku układów c.o. (duże różnice strumieni po obu stronach wymiennika $G_s \ll G_i$). W przypadku układów c.w.u. w których różnice strumieni są mniejsze lub też bardzo często mamy sytuację odwrotną ($G_s \geq G_i$) w niekorzystnych warunkach może nastąpić przepływ laminarny po stronie wody instalacyjnej co przyczyni się do znacznego zmniejszenia sprawności wymiany ciepła i w konsekwencji mniejszego schłodzenia wody sieciowej.

W przypadku wymienników płytowych uzyskanie dużych współczynników przenikania ciepła wiąże się z doбором zarówno odpowiedniego rodzaju i ilości płyt, jak również z konfiguracją ich połączeń. W przypadku dużych różnic strumieni wody sieciowej (np. wymiennik c.o.) uzyskanie wymaganych spadków ciśnień może spowodować albo znaczące zmniejszenie prędkości przepływu po stronie wody sieciowej bądź zmianę konfiguracji typu lub połączenia płyt. W pierwszym przypadku wymiennik będzie uzyskiwał wysokie współczynniki k tylko w warunkach obliczeniowych. Zmiana konfiguracji płyt polega na zastosowaniu w obrębie jednego wymiennika dwóch rodzajów płyt – o mniejszej możliwości wymiany ciepła, ale mniejszych stratach ciśnień (np. w wymiennikach Alfa Laval płyty typu L) oraz większej możliwości wymiany ciepła ale większych stratach ciśnień (np. w wymiennikach Alfa Laval płyty typu H). Rodzaje płyt różnią się kątem rozwarcia jodełki, co ma wpływ na parametry termodynamiczne oraz hydrauliczne. Zmiana konfiguracji połączenia płyt polega na zastosowaniu w obrębie wymiennika zarówno przepływów współprądowych jak i przeciwprądowych poprzez odpowiednie połączenie wiązek płyt. W obu przypadkach uzyskujemy mniejsze schłodzenia końcowe.

Porównanie warunków pracy (w układach c.o.) obu typów wymienników zawarto w publikacji M. Milaniuka [16]. Przydatność obu typów wymienników do pracy w układach ciepłowniczych została wielokrotnie zweryfikowana (np. M. Milaniuk [16], J. Wollerstrand [17], B. Skagestad, P. Mildenstein [18]).

Część firm ciepłowniczych (w tym MPEC Wrocław), wymaga aby wymienniki płytowe stosowane do układów c.w.u. miały konstrukcję rozbieralną (M. Zezula [8]). Takie rozwiązanie ułatwia czyszczenie wymiennika z osadów kamienia kotłowego, umożliwia zmianę mocy wymiennika, ale zwiększa koszty inwestycyjne. Możliwe jest również zabudowanie obu stopni

wymiennika c.w.u. na wspólnej ramie nośnej (np. wymienniki M6M firmy Alfa Laval).

3.3 Temperatury obliczeniowe instalacji centralnego ogrzewania a węzły ciepłownicze

Jedną z funkcji węzła ciepłowniczego dwufunkcyjnego jest zaopatrzenie w ciepło instalacji grzewczej w budynku. Do niedawna w Polsce w budynkach zasilanych z węzłów ciepłowniczych stosowane były najczęściej dwa parametry obliczeniowe instalacji grzewczych: 95/70°C oraz 90/70°C. Obecnie, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [19] w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi zabrania się stosowania wodnych instalacji ogrzewczych o temperaturze czynnika grzejącego przekraczającego 90°C. Ze względów higienicznych istnieje tendencja do zmniejszania temperatur instalacji ogrzewczych. Obecnie w Polsce coraz popularniejsze stają się ogrzewania o parametrach 80/60°C, 70/50°C (notabene np. w Szwecji stosowane od lat 60) W Danii obecnie temperatury instalacji ogrzewczych wynoszą 70/40°C (B. Skagestad, P. Mildenstein [18]). W przypadku zastosowania w części budynku ogrzewania podłogowego parametry wody powracającej do wymiennika c.o. mogą być jeszcze niższe. Stosowanie coraz niższych parametrów instalacji c.o. ma wpływ na obniżenie końcowej temperatury wody sieciowej. Przy niskich temperaturach zewnętrznych temperatura wody powracającej z c.o. determinuje średnią dobową temperaturę wody powracającej z węzła ciepłowniczego przy braku odbioru c.o. W okresie letnim największy wpływ na średnią dobową temperaturę wody powracającej z węzła ma temperatura cyrkulacji (H. Zinko, L. Hoon, K. Bong - Kyun, K. Youn - Hong, L. Hakan, A. Loewen, H. Seungkyu, H. Walletun, M. Wigbels [20]).

Stosowane metody doboru węzłów ciepłowniczych dwustopniowych opierają się na założeniu, że rozkład mocy cieplnej w punkcie załamania wykresu ciepłowniczego wynosi 50 / 50 % pomiędzy pierwszym a drugim stopniem c.w.u. (55 % na drugim stopniu w przypadku uwzględnienia instalacji cyrkulacyjnej). Takie założenie było słuszne, gdy parametry obliczeniowe instalacji c.o. wynosiły 90 (95) / 70°C. Pojawia się zatem pytanie jaki wpływ będą miały obniżone parametry ogrzewania na rozkład mocy pomiędzy stopniami wymienników c.w.u.

3.4 Instalacje ciepłej wody użytkowej

Warunki techniczne użytkowania ciepłej wody użytkowej zawarte są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [19]. Zgodnie z nimi instalacja ciepłej wody powinna zapewniać uzyskanie w punktach czerpalnych temperatury wody nie niższej niż 55°C i nie wyższej niż 60°C, przy czym instalacja ta powinna umożliwiać przeprowadzanie jej okresowej dezynfekcji termicznej przy temperaturze wody nie niższej niż 70°C. W Europie wymagane temperatury c.w.u. przyjmowane

są od 55 do 65°C (B. Skagestad, P. Mildenstein [18]).

Prawidłowe określenie obliczeniowych strumieni ciepłej wody użytkowej w stosunku do rzeczywistych wymagań obiektu jest bardzo trudne. Na obliczeniowy strumień c.w.u. wpływ ma zarówno ilość osób, ilość i wielkość mieszkań, wyposażenie mieszkań w wodomierze, jak i przyzwyczajenia oraz status zawodowy mieszkańców (np. procent osób czynnych zawodowo).

Stosowane metody statystyczne opierają się zazwyczaj na dwóch różnych wielkościach – ilości mieszkańców lub ilości i wyposażeniu mieszkań. Określenie strumienia obliczeniowego w pierwszym przypadku (Polska Norma [21], Ramowe wytyczne projektowania [22]) polega na założeniu zapotrzebowania ciepłej wody dla jednej osoby (np. 110-130 dm³/md Polska Norma [21]) oraz współczynników nierównomierności rozbioru (wynikającej z całkowitej liczby mieszkańców), w drugim przypadku (DIN 4708 [23], Danish Standards [24]), polega na określeniu ilości mieszkań oraz współczynników nierównomierności rozbioru.

Podczas projektowania nowych węzłów ciepłowniczych lub modernizacji istniejących zazwyczaj małą uwagę poświęca się instalacji cyrkulacyjnej w budynku. Jej zadaniem jest zapewnienie stałego obiegu wody, także na odcinkach przewodów o objętości wewnątrz przewodu powyżej 3 dm³ prowadzących do punktów czerpalnych (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury [19]), i niedopuszczenie do nadmiernego spadku temperatury ciepłej wody użytkowej podczas braku rozbioru a tym samym obniżenia jakości dostawy c.w.u.

Wytyczne projektowania instalacji cyrkulacyjnej zawarte są w Polskiej Normie [21]. Jednym z elementów prawidłowego działania instalacji cyrkulacyjnej jest dobór pompy cyrkulacyjnej. Obliczeniowy punkt pracy pompy cyrkulacyjnej należy określać uwzględniając obliczeniowy strumień wody cyrkulacyjnej oraz wysokość podnoszenia niezbędną do pokonania strat ciśnienia w układzie cyrkulacyjnym oraz strat ciśnienia w węźle ciepłowniczym przy obliczeniowym strumieniu wody cyrkulacyjnej. W opracowaniu autorstwa J. Jeżowieckiego, D. Brydak-Jeżowieckiej, J. Giełdy, S. Kijaka, A. Tiukało, J. Zaleskiego [25] można znaleźć zalecenia do przewymiarowania pompy cyrkulacyjnej, tak aby w punkcie jej współpracy wydajność była większa o około 20% od wydajności obliczeniowej.

Podczas eksploatacji, długi czas oczekiwania (zazwyczaj jako normę przyjmuje się czas oczekiwania równy 10 sekund) na wymaganą temperaturę ciepłej wody u odbiorcy zamiast prowadzić do regulacji instalacji cyrkulacyjnej, prowadzi najczęściej do zwiększenia wydajności i wysokości podnoszenia pompy cyrkulacyjnej.

Duży strumień wody cyrkulacyjnej stabilizuje wahania temperatury ciepłej wody użytkowej (wraz z instalacją stanowi swoisty układ zasobnika c.w.u.) ale równocześnie powoduje podnoszenie temperatury powrotu wody sieciowej szczególnie w przypadku stosowania niskotemperaturowych

instalacji c.o. (S. Fredriksen, D. Nikolic, J. Wollerstrand [26]).

Jedną z metod racjonalizacji pracy instalacji cyrkulacyjnej polegającej na dostawie wymaganego strumienia wody cyrkulacyjnej do poszczególnych pionów jest zastosowanie termostatycznych zaworów regulacyjnych na pionach cyrkulacyjnych (E. Nowakowski [27]). W Polsce takie systemy wchodzi dopiero na rynek, w Europie stosowanie ich stało się praktyką (L. Brinkmann, A. Dyrelund [28]).

3.5 Podsumowanie

Ze względu na dużą konkurencję ze strony indywidualnych kotłowni gazowych firmy ciepłownicze często borykają się z problemami pozyskiwania nowych klientów oraz ograniczeniu przechodzenia odbiorców ciepła z systemów ciepłowniczych do konkurencji. Aktualnie klienci wymagają dużej elastyczności w porównaniu do aktualnie stosowanych rozwiązań węzłów ciepłowniczych (indywidualnie dostosowanie parametrów instalacji wewnętrznej, zapewnienie możliwości i prostoty rozliczenia się z poszczególnymi odbiorcami). Zaletą zasilania obiektów w ciepło z sieci ciepłowniczych jest bezpieczeństwo i wygoda użytkowników, wadą są zwykle większe koszty inwestycyjne.

Racjonalizacja struktury węzłów ciepłowniczych na etapie projektowania powinna polegać na wyborze optymalnego do potrzeb i wymagań klienta typu węzła ciepłowniczego pozwalającego przy zachowaniu jakości dostawy ciepła na obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Na etapie eksploatacji węzła ciepłowniczego racjonalizacja polega na analizie pracy węzła ciepłowniczego i wypracowaniu szeroko rozumianego algorytmu jego sterowania pozwalającego na uzyskanie maksymalnej sprawności węzła ciepłowniczego (np. poprzez działania mające na celu zwiększenie schłodzenia wody sieciowej powracającej z węzła ciepłowniczego).

Poprawne zaprojektowanie jak i eksploatację węzła ciepłowniczego ułatwiłby program symulacyjny (model symulacyjny) umożliwiający na analizę pracy węzłów ciepłowniczych o różnej konfiguracji i możliwości zadania zmiennych parametrów wejściowych takich jak temperatury wody sieciowej i instalacyjnej, strumień ciepłej wody użytkowej.

4. Cel pracy

Celem pracy jest racjonalizacja warunków pracy wielofunkcyjnych węzłów ciepłowniczych na przykładzie dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego dla wielorodzinnego budynku mieszkalnego oparta na analizie wyników uzyskanych z teoretycznego modelu węzła oraz badań eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie.

Celami pośrednimi są:

- opracowanie nowego oryginalnego modelu symulacyjnego (programu symulacyjnego) węzła ciepłowniczego pozwalającego na analizę pracy węzłów ciepłowniczych o różnej konfiguracji i zadanych parametrach wejściowych'
- wskazanie możliwości przeprowadzenia analiz na podstawie modeli numerycznych, które umożliwiają przeprowadzenie eksperymentu, również dla nieistniejących jeszcze obiektów,
- ze względu na brak informacji w literaturze dotyczących pracy i wytycznych do projektowania węzłów pierwszostopniowych przebadanie i opisanie warunków ich pracy.

Analizie zostaną zatem poddane standardowe węzły ciepłownicze dwufunkcyjne (szeregowo-równoległy oraz równoległy) i porównane z węzłem pierwszostopniowym.

5.Teza

- 1) Opracowany oryginalny teoretyczny model symulacyjny węzła ciepłowniczego umożliwia wykonanie analizy przepływów wody sieciowej w całym sezonie grzewczym będącej podstawą do racjonalizacji warunków pracy wielofunkcyjnych węzłów ciepłowniczych.
- 2) Węzły pierwszostopniowe mogą stanowić uzupełnienie rodziny węzłów ciepłowniczych. W określonych warunkach zastosowanie tego typu węzła ciepłego może dać konkretne korzyści techniczne i ekonomiczne.

6.Model węzła ciepłowniczego

Podczas opracowywania modelu węzła ciepłowniczego jako główny cel postawiono skonstruowanie programu symulacyjnego pozwalającego na analizę przepływów wody sieciowej w węzłach ciepłowniczych przy zadanych parametrach wejściowych (temperaturze zewnętrznej, temperaturze wody sieciowej i instalacyjnej, zapotrzebowaniu ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej). Ze względu na to, iż wymagany cel można uzyskać modelując pracę węzła w warunkach stacjonarnych, nie zdecydowano się na zbudowanie modelu dynamicznego.

6.1 Założenia

Opracowanie i wykonanie uniwersalnego modelu węzła ciepłowniczego bez założenia pewnych uproszczeń byłoby zadaniem bardzo trudnym do wykonania. Z tego powodu przy budowaniu nowego modelu węzła ciepłowniczego zdecydowano się założyć następujące uproszczenia:

- ze względu na dużą szybkość zmian zachodzących w węźle założono, iż praca węzła

odbywa się w warunkach stacjonarnych,

- wymiana ciepła odbywa się w stanie ustalonym,
- duża akumulacyjność budynku powoduje nieskończone opóźnienie odpowiedzi na zakłócenia pracy węzła ciepłowniczego,
- straty ciepła przez przewody i urządzenia są pomijalne,
- zmiany zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku są liniowo uzależnione od temperatury zewnętrznej,
- temperatury wody sieciowej i instalacyjnej są zawsze zgodne z przyjętymi wykresami regulacyjnymi,

Podczas konstruowania modelu założono jego modułową budowę. Taka konstrukcja umożliwia stosunkowo szybką zmianę zarówno konfiguracji węzła ciepłowniczego jak i możliwość rozbudowy modelu o dodatkowe funkcje. Poniżej przedstawiono najważniejsze elementy modelu.

6.2 Wykresy regulacyjne

Na potrzeby modelu przyjęto wykresy regulacyjne opracowane w formie wzorów obliczeniowych uzależnione od temperatury zewnętrznej (t_{zew}), temperatury zewnętrznej obliczeniowej (t_{zew}^{obl}), temperatur obliczeniowych wody sieciowej (T_z^{obl}, T_p^{obl}), i instalacyjnej (t_z^{obl}, t_p^{obl}), oraz wykładnika potęgowego charakterystyki cieplnej grzejnika (m).

6.2.1 Wykres regulacyjny wody sieciowej

$$T_z = \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \cdot \left(\frac{t_z^{obl} + t_p^{obl}}{2} - t_w^{obl} \right) + t_w + \left((T_z^{obl} - T_p^{obl}) - \frac{1}{2} \cdot (t_z^{obl} - t_p^{obl}) \right) \cdot \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right) \quad (6.1)$$

Na podstawie opracowania R. Śnieżyka [29]

6.2.2 Wykres regulacyjny wody instalacyjnej c.o.

$$t_z = \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \cdot \left(\frac{t_z^{obl} + t_p^{obl}}{2} - t_w^{obl} \right) + t_w + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right) \cdot (t_z^{obl} - t_p^{obl}) \quad (6.2)$$

$$t_p = \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \cdot \left(\frac{t_z^{obl} + t_p^{obl}}{2} - t_w^{obl} \right) + t_w - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_w - t_{zew}}{t_w - t_{zew}^{obl}} \right) \cdot (t_z^{obl} - t_p^{obl}) \quad (6.3)$$

Na podstawie opracowania J. S. Mielnickiego [30]

6.3 Ciepła woda użytkowa

W modelu przyjęto jako podstawę do obliczeń strumień ciepłej wody użytkowej oraz jej temperatury obliczeniowe (temperatura wody zimnej oraz wymagana temperatura ciepłej wody użytkowej). Istnieje również możliwość uwzględnienia w obliczeniach strumienia i temperatury wody cyrkulacyjnej.

6.4 Wymienniki ciepła

Najważniejszym elementem modelu węzła ciepłowniczego są wymienniki ciepła. Do modelu przyjęto 3 metody symulacji wymienników ciepła (jedna dla wymienników JAD, jedna dla wymienników płytowych oraz jedna metoda uniwersalna pozwalająca na symulację wymiennika o dowolnej konstrukcji).

6.4.1 Wymienniki JAD

W modelu wykorzystano dwa najpopularniejsze typy wymienników JAD (3.18 oraz 6.50)

Zależności opisujące pracę wymienników JAD zaczerpnięto z opracowania firmy Termowent [31].

6.4.2 Wymienniki płytowe

Wszystkie firmy produkujące wymienniki płytowe opierają obliczenia wykonywane w programach obliczeniowych na podstawie charakterystyk konkretnych konfiguracji płyt (uzyskanych w sposób eksperymentalny). Każdy rodzaj płyt i ich konfiguracja stanowi zatem unikalny układ obliczeniowy który bez danych producenta nie może w satysfakcjonujący sposób zostać obliczony. Żadna z firm nie udostępnia danych dotyczących charakterystyk traktując je jako tajemnicę handlową.

W literaturze (np: A.Cooper, J.D. Usher [32], T. Zaleski, K. Klepacka [33]) można znaleźć trzy podstawowe metody symulacji pracy i obliczeń płytowych wymienników ciepła. Najprostszą metodą jest zastosowanie metody sprawnościowej przy założonym średnim lub interpolowanym współczynniku przenikania ciepła k , druga opiera się na wzorach kryterialnych dla określonego typu płyt wymienników ciepła pozwalających wyliczyć współczynniki przejmowania ciepła a w konsekwencji określić współczynnik przenikania, trzecia polega na rozwiązywaniu układów równań różniczkowych odwzorowujących wymianę ciepła (stosowana przede wszystkim przy analizie dynamicznych zmian w wymienniku ciepła).

W niniejszej pracy posłużono się dwoma metodami symulacji:

- Metoda oparta o literaturowe wzory kryterialne

Opisana poniżej metoda obliczeń wymienników płytowych została zaczerpnięta z książki T. Zaleskiego, K. Klepackiej [33] i polega na obliczeniu współczynników przejmowania ciepła w oparciu o wzory kryterialne dla płyt o tłoczeniu pralkowym. Obecnie większość wymienników płytowych ma płyty o tłoczeniu w jodełkę. Z tego względu wzory opisujące liczbę kryterialną Nusselta dla tego rodzaju płyt zaczerpnięto z książki autorstwa J. Madejskiego [34], (jako źródło podano pracę L. M. Kowalenko [35]). Wzory mogą być stosowane dla liczb kryterialnych z zakresu $2 < Pr < 50$, $200 < Re < 16000$.

$$Nu = 0.135 Re^{0.73} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (6.4)$$

gdzie:

Pr_f liczba Prandtla dla temperatury płynu,

Pr_w liczba Prandtla dla temperatury ścianki.

Przy określonym układzie płyt oraz ich cech charakterystycznych (szacowanych dla konkretnego wymiennika na podstawie wyników obliczeń uzyskanych z programu obliczeniowego producenta – przede wszystkim prędkości w kanałach) możliwe jest obliczenie współczynników przejmowania ciepła dla obu stron płyty wymiennika wiedząc że:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} \quad (6.5)$$

gdzie: λ współczynnik przewodzenia ciepła dla wody, d_e średnica hydrauliczna płyty.

Znając współczynniki przejmowania ciepła oraz znając konstrukcję płyty można obliczyć współczynnik przenikania ciepła w oparciu o wzór 6.6.

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda_{sc}} \right)} \quad (6.6)$$

gdzie:

α_1, α_2 współczynniki przejmowania ciepła po obu stronach płyty wymiennika,

δ grubość płyty wymiennika,

λ_{sc} współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty wymiennika.

Ze względu na brak dokładnych informacji dotyczących cech charakterystycznych zastosowanych płyt (w szczególności średnicy hydraulicznej kanałów w poszczególnych modelach wymienników) trudno jest prawidłowo wyliczyć współczynniki przewodzenia ciepła dla danych parametrów wejściowych. Zastosowany wzór nie uwzględnia również zmiennego kąta tłoczenia dla różnych typów płyt. Z doświadczeń Autora wynika, że różnice pomiędzy obliczanymi wartościami współczynników przewodzenia ciepła a wartościami podanymi przez program obliczeniowy producenta (dla tych samych parametrów wejściowych) sięgają około 40%

- Metoda sprawnościowa (aproksymacja zmienności współczynnika k)

Przy analizowaniu pracy płytowych wymienników ciepła przy zmiennych parametrach wejściowych wykorzystano metodę sprawnościową (NTU) (W. Nowak [36], D. Pitts, L. Sissom [37]) przy aproksymowanym współczynniku przenikania ciepła k . Ze względu na uniwersalność tej metody może ona być stosowana do wszystkich typów wymienników. Najlepsze rezultaty można było by uzyskać obliczając współczynnik k dla dobranych wymienników płytowych. Ze względu na brak wiarygodnych wzorów kryterialnych (por. poprzedni podpunkt) obliczenia przeprowadzono w oparciu o aproksymowany współczynnik przenikania ciepła. Do opisu zmienności współczynnika przyjęto wzór (6.7) (na podstawie H. Koczyk, M Radziszewski, T. Wilczak [38]):

$$k = c \cdot \dot{m}_1^{a_1} \cdot \dot{m}_2^{a_2} \quad (6.7)$$

gdzie:

c , a_1 , a_2 – współczynniki dla poszczególnych wymienników obliczone na podstawie wyników analizy pracy wymienników,

$\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$ – strumienie wody przepływającej przez wymiennik ($\dot{m}_1$ – strumień wody grzejnej, $\dot{m}_2$ – strumień wody ogrzewanej).

Zaletą metody jest możliwość analizy dowolnego typu wymienników dla których możemy wyliczyć współczynniki c , a_1 , a_2 (zarówno na podstawie wyników uzyskanych z programów obliczeniowych jak i wyników badań). W przypadku gdy za współczynnik c podstawimy średni współczynnik k a współczynniki a_1 , a_2 przyrównamy do zera symulację przeprowadzimy w oparciu o średni współczynnik k .

Wadą tej metody są stosunkowo duże błędy względne aproksymacji które jednak nie dyskwalifikują wybranej metody.

W metodzie sprawnościowej (NTU) korzysta się z pojęcia sprawności wymiennika η . Sprawność wymiennika ciepła określa się stosunkiem wymienionego ciepła Q do teoretycznie maksymalnego strumienia ciepła $Q_{\max}$, który mógłby być wymieniony przy pełnym wykorzystaniu różnicy temperatur. Byłoby to możliwe w wymienniku przeciwprądowym z nieskończenie dużą powierzchnią wymiany ciepła.

Opisana metoda pozwala na skrócenie czasu obliczeń w stosunku do metody bazującej na średniej różnicy temperatur.

W literaturze można znaleźć wzory (lub wykresy) opisujące sprawność wymiennika dla dowolnej jego konfiguracji. Poniżej zamieszczono przykładowy wzór opisujący sprawność wymiennika przeciwprądowego (wzór 6.8).

$$\eta = \frac{1 - e^{-N \left(1 - \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}\right)}}{1 - \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}} \cdot e^{-N \left(1 - \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}\right)}} \quad (6.8)$$

gdzie N to liczba jednostek przenikania ciepła definiowana jako:

$$N = \frac{k_{sr} A_0}{\dot{W}_{\min}} \quad (6.9)$$

a $\dot{W}$ pojemność cieplna strumienia

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot c_p \quad (6.10)$$

Wzory aproksymacyjne lepkości kinematycznej oraz gęstości wody wykorzystane w programie symulacyjnym (wzory 6.11 oraz 6.12) zaczerpnięto z [39].

Lepkość kinematyczna m^2/s dla $10^\circ\text{C} < t < 200^\circ$

$$\nu = [556406.7 + 19689.27 \cdot t + 124.6096 \cdot t^2 - 0.3783792 \cdot t^3]^{-1} \quad (6.11)$$

(maksymalny błąd 0.36%)

Gęstość wody kg/m^3 dla $10^\circ\text{C} < t < 200^\circ$

$$\rho = 1006 - 0.26 \cdot t - 0.0022 \cdot t^2 \quad (6.12)$$

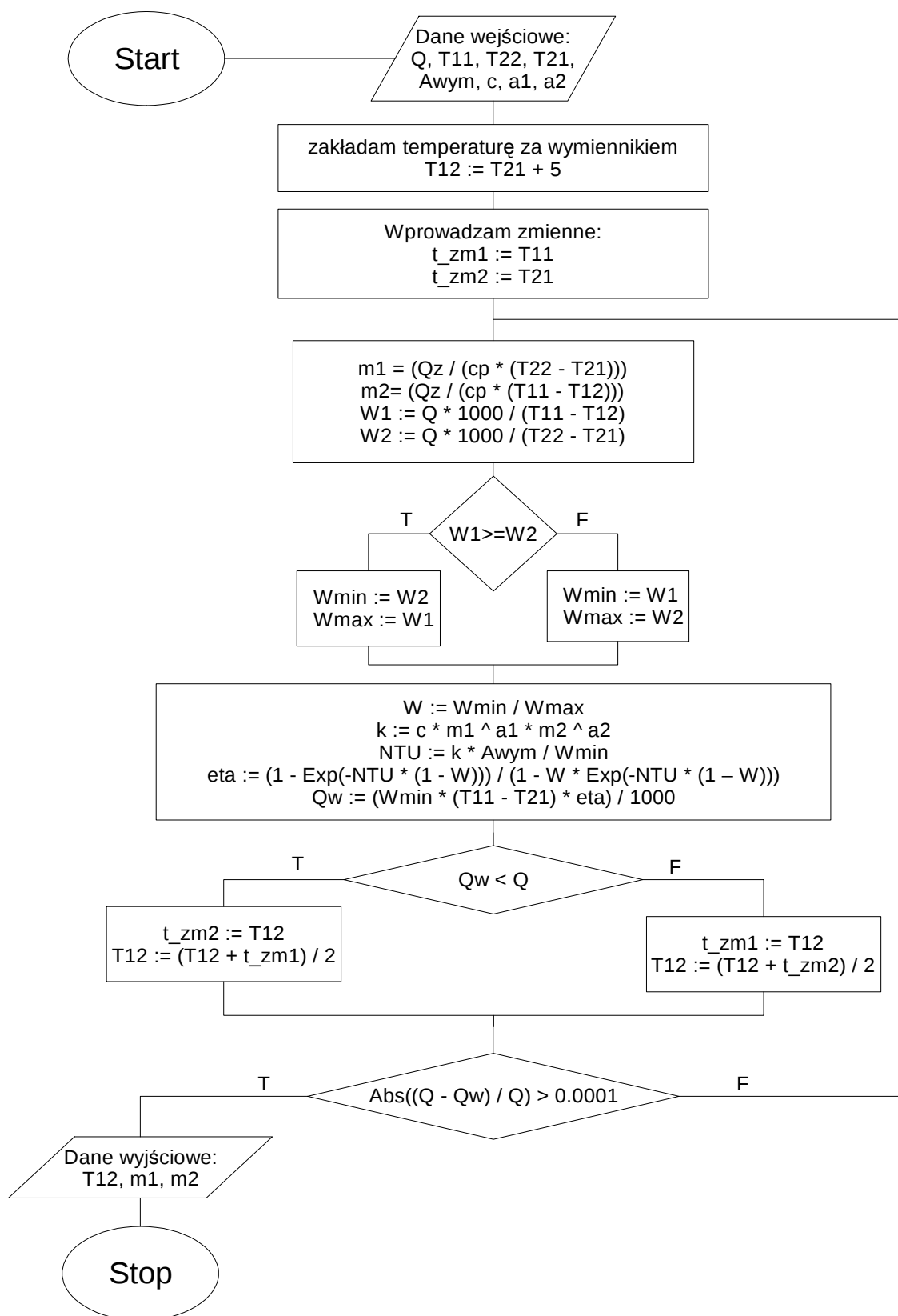
(maksymalny błąd 0.16%)

6.5 Opis modelu symulacyjnego

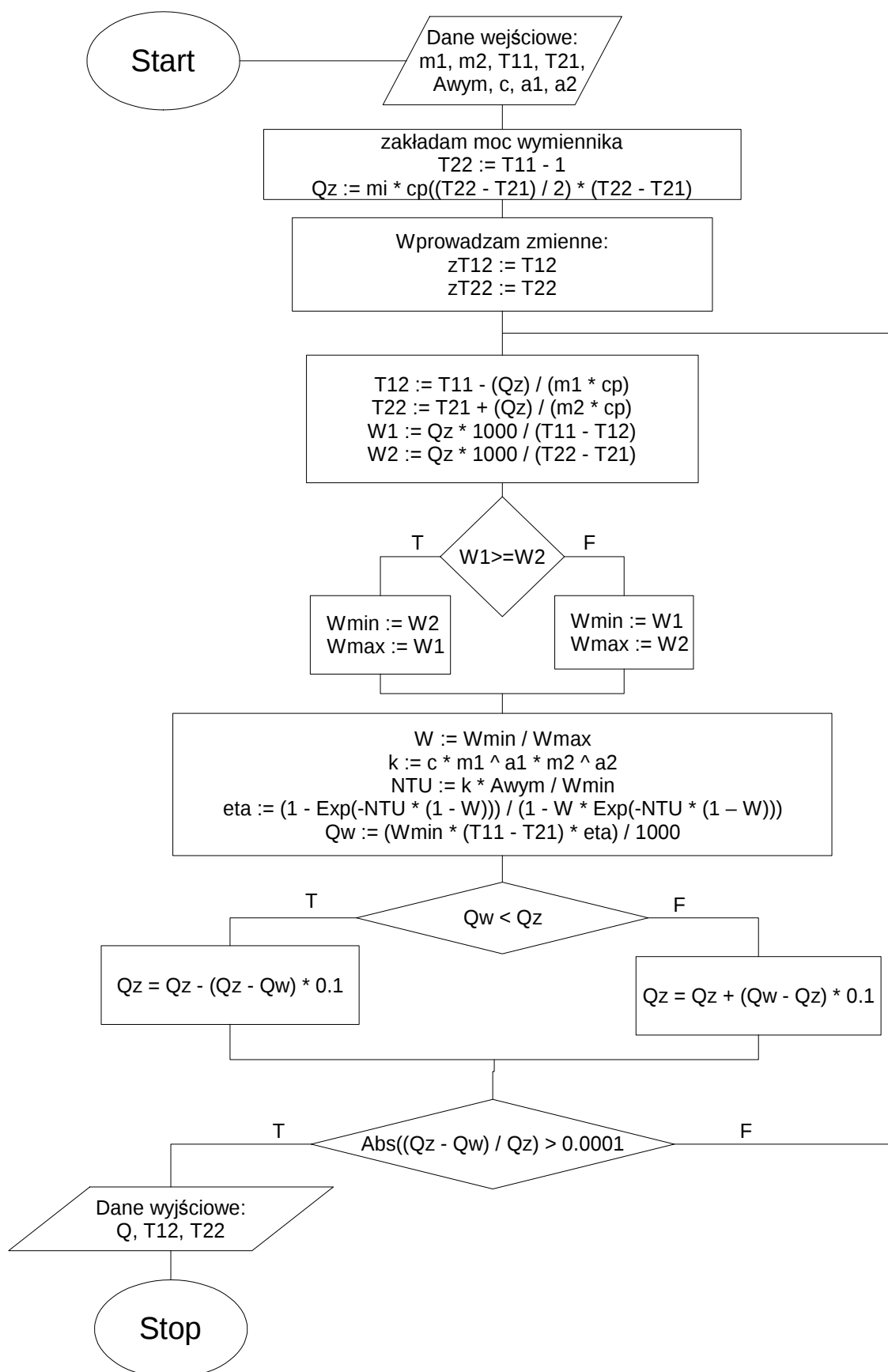
Aby umożliwić łatwe wykorzystanie modelu pracy węzłów ciepłowniczych, model został opracowany w formie programu komputerowego napisanego przez Autora od podstaw w języku programowania Microsoft Visual Basic. Przy pisaniu programu korzystano między innymi z książek M. Halvorsona [40] oraz R. Sedgewicka [41]. Ze względu na obszerność zagadnienia (listing programu liczy ponad 5700 linii) w niniejszej pracy przedstawione zostaną wyłącznie podstawowe informacje dotyczące wykonanego modelu symulacyjnego.

6.5.1 Algorytmy obliczeń – przykłady

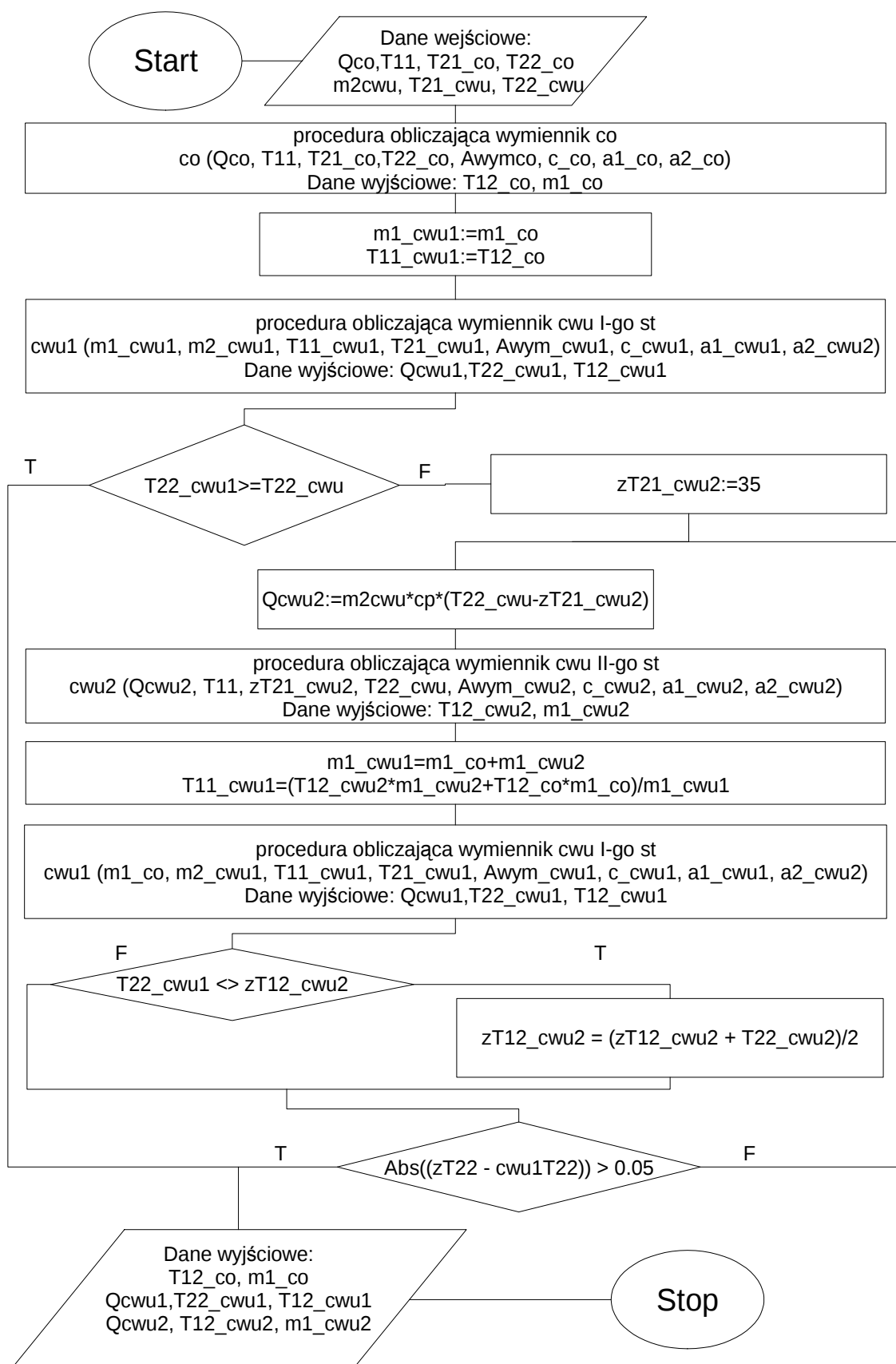
Na rysunkach od 7 do 9 przedstawiono przykładowe schematy blokowe zastosowanych w modelu algorytmów obliczeń. W programie symulacyjnym zastosowano dwa podstawowe moduły określające wymienniki w węźle ciepłowniczym. Pierwszy z nich jest stosowany gdy znane są: temperatura na wejściu do wymiennika po stronie "gorącej" (T_{11}), temperatura na wejściu do wymiennika po stronie "zimnej" (T_{21}), temperatura na wyjściu z wymiennika po stronie "zimnej" (T_{22}), strumień wody instalacyjnej po stronie "zimnej" (m_2) oraz moc wymiennika Q . Nieznanymi parametrami są w tym przypadku temperatura na wyjściu z wymiennika po stronie "gorącej" (T_{12}) oraz strumień wody sieciowej po stronie "gorącej" (m_1). Taka sytuacja dotyczy dwóch typów wymienników w węźle ciepłowniczym – wymiennika c.o. oraz wymiennika c.w.u. II-go stopnia. Algorytm obliczeń wymiennika na przykładzie wymiennika płytowego z aproksymowanym współczynnikiem k przedstawiono na rys. 7. Drugi moduł dotyczy sytuacji w której znane są: temperatura na wejściu do wymiennika po stronie "gorącej" (T_{11}), temperatura na wejściu do wymiennika po stronie "zimnej" (T_{21}), strumień wody sieciowej po stronie "gorącej" (m_1) oraz, strumień wody instalacyjnej po stronie "zimnej" (m_2). Nieznanymi parametrami są w tym przypadku temperatura na wyjściu z wymiennika po stronie "gorącej" (T_{12}), temperatura na wyjściu z wymiennika po stronie "zimnej" (T_{22}) oraz moc wymiennika Q . Taka sytuacja dotyczy wymiennika c.w.u. I-go stopnia. Algorytm obliczeń wymiennika na przykładzie wymiennika płytowego z aproksymowanym współczynnikiem k przedstawiono na rys. 8. Na rysunku 9 przedstawiono algorytm obliczeń węzła szeregowo-równoległego (bez uwzględnienia cyrkulacji).



Rysunek 7: Schemat blokowy algorytmu obliczeń w module wymiennika c.o. oraz c.w.u. II-go stopnia



Rysunek 8: Schemat blokowy algorytmu obliczeń w module wymiennika c.w.u.
I - go stopnia



Rysunek 9: Schemat blokowy algorytmu obliczeń w module węzła szeregowo - równoległego

6.5.2 Program symulacyjny

Symulacje pracy węzłów ciepłowniczych przeprowadza się obliczając przepływy wody sieciowej dla poszczególnych temperatur zewnętrznych. W programie przyjęto obliczanie z krokiem co 1°C od temperatury zewnętrznej (np. -18°C) do umownej temperatury końca sezonu grzewczego (w programie przyjętej jako $+12^{\circ}\text{C}$). Dodatkowo obliczenia uzupełnione zostały o następujące punkty charakterystyczne: załamania wykresu regulacyjnego wody sieciowej (definiowanych jako T_{up} , T_{down}), oraz okres letni (praca węzła wyłącznie na potrzeby c.w.u.). Jak wspomniano w założeniach symulacje wykonywane są przy założeniu, iż praca węzła odbywa się w warunkach stacjonarnych. Nie uwzględniono zatem akumulacyjności cieplnej zarówno po stronie węzła jak i budynku.

Na rysunku 10 zamieszczono okno wprowadzania danych. Za jego pomocą można zdefiniować: założone wykresy regulacyjne wody sieciowej i instalacyjnej, moc obliczeniową centralnego ogrzewania, strumień obliczeniowy ciepłej wody użytkowej oraz wybrać typ węzła do analizy. Strumień c.w.u. może zostać obliczony zgodnie z metodą proponowaną przez S. Mańkowskiego w [6] (metoda2), zgodnie z Polską Normą [21] (metoda 1), na podstawie założonej mocy c.w.u. lub też wpisany ręcznie.

Zbudowany model umożliwia analizę pracy węzłów szeregowo-równoległego, równoległego oraz nietypowych węzłów jednostopniowych szeregowych (pierwszostopniowych). Praca każdego z węzłów może być analizowana przy różnych metodach symulacji wymienników (węzły z wymiennikami JAD, węzły z wymiennikami płytowymi których obliczenia bazują na wzorach kryterialnych i metodzie sprawnościowej – w tym wypadku na stałe zostały wpisane dane wymienników z węzła Gliniana 75 wykorzystane w dalszej części pracy oraz węzły, których obliczenia bazują na metodzie sprawnościowej i aproksymacji współczynników k).

wprowadzanie danych

dane do wykresu regulacyjnego

woda sieciowa

Tzas obl	Tpow obl	zas obl	tpow obl	wsp m	T up	T down
150	75	90	70	0.35	130	70

woda instalacyjna

zas obl	tpow obl	wsp m	Tzew obl	twew
90	70	0.35	-18	20

dane do obliczeń

c.o.

124.4	kW
-18	°C

c.w.u. - z liczby osób

l.osób	qmax	l/os
100	130	
3,5	kh	

c.w.u. - z mocy

podaj moc c.w.u.
98,97
kW

pozostałe dane

tcwu=	55	°C
twz=	10	°C

$$Q_{cwu}^{maxh} = \frac{n \times q_j \times \Delta t \times c_p \times K_h}{24 \times 3600}$$

L.m	50	100	150	200	300	500	1000	3000	6000
K _h	4.5	3.7	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1	2.0

metoda2

strumień obliczeniowy cwu

mcwu= 0,527 kg/s

wybierz węzeł do obliczeń

węzły z wymiennikami JAD

węzeł równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy węzeł szeregowo-równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy wersja 2

węzły NTU (wymenniki Gliniana 75 współczynnik k - wzory kryterialne)

węzeł równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy węzeł szeregowo-równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy wersja 2

węzły NTU (aproksymacja współczynnika k)

węzeł równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy węzeł szeregowo-równoległy węzeł jednostopniowy szeregowy wersja 2

Rysunek 10: Okno wprowadzania danych

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe okno wprowadzania danych dla węzła równoległego z wymiennikami JAD. Program pozwala na określenie rodzaju i ilości wymienników oraz określenia strumienia i temperatury wody cyrkulacyjnej.

węzeł równoległy

typ wymiennika cwu jad3.18 Qco kW 13:35:48

typ wymiennika co jad3.18

tcwu $\Delta p=$ kPa

S 1 R 1 ms= kg/s

Qcwu kW T2 °C

Ts °C jad 3.18 $\Delta p=$ kPa

mcwu= kg/s mcyrk kg/s

tcyrk °C $\Delta p=$ kPa

ms= kg/s

tz °C jad 3.18 $\Delta p=$ kPa

mi= kg/s

Tm °C

0 kg/s

T2 °C

0%

Oblicz

Rysunek 11: Okno wprowadzania danych dla węzła równoległego z wymiennikami JAD

Na rysunku 12 przedstawiono przykładowe okno wprowadzania danych dla węzła szeregowo – równoległego z wymiennikami których obliczenia bazują na metodzie sprawnościowej i aproksymacji współczynników k . Program pozwala na wprowadzenie powierzchni wymiany ciepła, danych służących do aproksymacji współczynników k , określenia strumienia i temperatury wody cyrkulacyjnej oraz miejsca włączenia instalacji cyrkulacyjnej.

The screenshot shows a software interface for calculating a parallel-series heat node. The title bar reads 'węzeł szeregowo-równoległy'. The interface includes a schematic diagram with several input fields and a 'Oblicz' (Calculate) button. Key input fields include:

- Δt_{wym} (K): 1.4
- m_2 (kg/s): 0
- a_1 (W/m²·K): 0
- c (J/kg·K): 2500
- a_2 (W/m²·K): 0
- ms (kg/s): [empty]
- Q_{cwu} (kW): [empty]
- T_s (°C): [empty]
- T_2 (°C): [empty]
- $mcwu$ (kg/s): [empty]
- m_{cyrk} (kg/s): [empty]
- t_{cyrk} (°C): [empty]
- t_{cwu} (°C): [empty]
- t_m (°C): [empty]
- Δt_{wym} (K): 2
- m_2 (kg/s): 0
- a_1 (W/m²·K): 0
- c (J/kg·K): 2500
- a_2 (W/m²·K): 0
- ms (kg/s): [empty]
- Q_{cwu} (kW): [empty]
- T_2 (°C): [empty]
- m_{cyrk} (kg/s): [empty]
- t_{cyrk} (°C): [empty]
- $mcwu$ (kg/s): [empty]
- t_z (°C): [empty]
- mi (kg/s): [empty]
- t_p (°C): [empty]

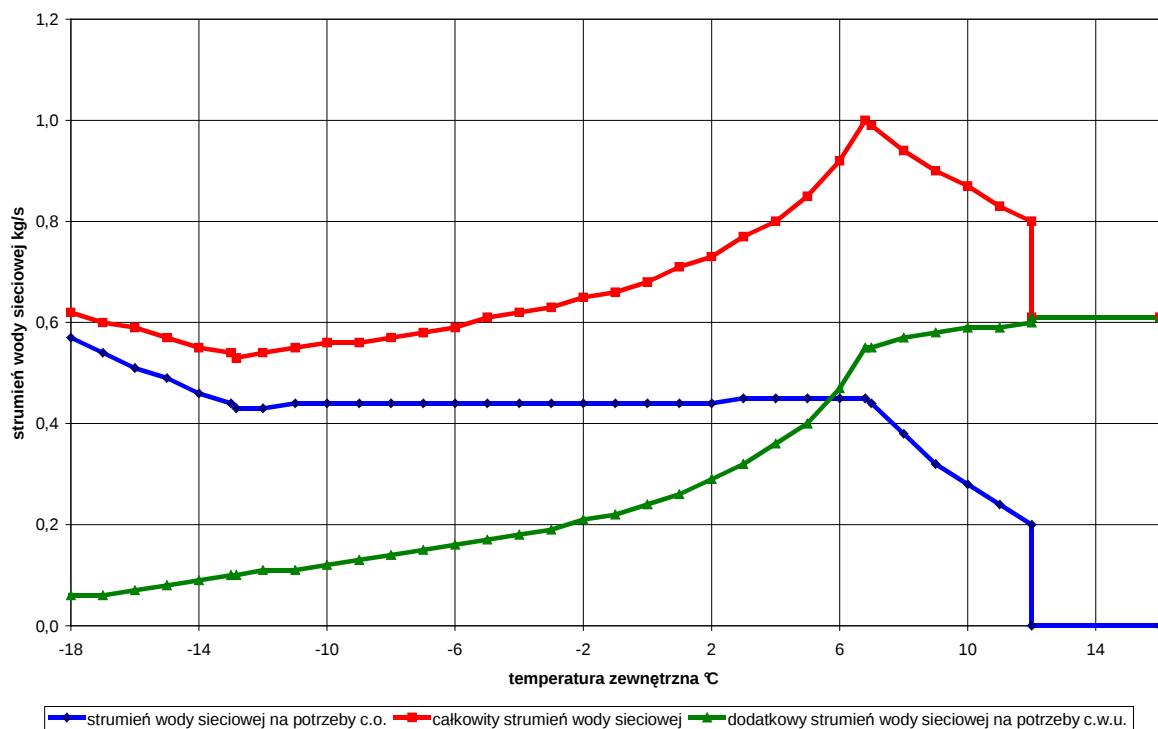
A digital clock in the top right corner displays '13:43:00'. A progress bar at the bottom left shows '0%'. A 'Oblicz' button is located at the bottom right of the main area.

Rysunek 12: Okno wprowadzania danych dla węzła szeregowo równoległego z wymiennikami których obliczenia bazują na metodzie sprawnościowej i aproksymacji współczynników k

Modelowanie pracy węzłów oparto na założeniu uzyskania jako efekt końcowy założonych parametrów pracy instalacji centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. W przypadku układu c.o. w wyniku obliczeń uzyskujemy wymagane temperatury zasilania i powrotu instalacji c.o. (zgodne z przyjętym wykresem regulacyjnym) oraz wymaganą moc wymiennika c.o. W przypadku układu c.w.u. w wyniku obliczeń uzyskujemy wymaganą temperaturę obliczeniową dla zadanego strumienia c.w.u. przy uwzględnieniu zadanego strumienia i temperatury wody cyrkulacyjnej. Obliczenia przeprowadzone są metodą kolejnych przybliżeń. Wyniki działania programu są zapisywane w pliku tekstowym który w łatwy sposób może zostać zaimportowany do dowolnego arkusza kalkulacyjnego i przedstawiony w postaci wykresu (rys. 13).

Za pomocą programu można w sposób uproszczony analizować wpływ wysokości priorytetu c.w.u. na końcowe strumienie wody sieciowej w węźle ciepłowniczym. W tym celu należy przeprowadzić analizę pracy węzła przy zmniejszonej (zredukowanej) mocy obliczeniowej na potrzeby centralnego ogrzewania i porównać uzyskane wyniki z wynikami wejściowymi. Uproszczenie zawarte w metodzie polega na założeniu stałych temperatur wody instalacyjnej przy

zmniejszonym strumieniu wody instalacyjnej. W rzeczywistości zmniejszenie przepływu wody sieciowej przed wymiennikiem c.o. spowoduje ograniczenie dostawy ciepła i zmianę temperatury powrotu wody sieciowej z wymiennika c.o. ale nie będzie miało bezpośredniego wpływu na zmiany strumienia wody instalacyjnej (taka zmiana może nastąpić w późniejszym etapie na skutek otwarcia się zaworów termostatycznych).



Rysunek 13: Przykładowy wynik obliczeń programu symulacyjnego zestawiony w postaci wykresu obrazującego zmienność przepływu wody sieciowej w funkcji temperatury zewnętrznej

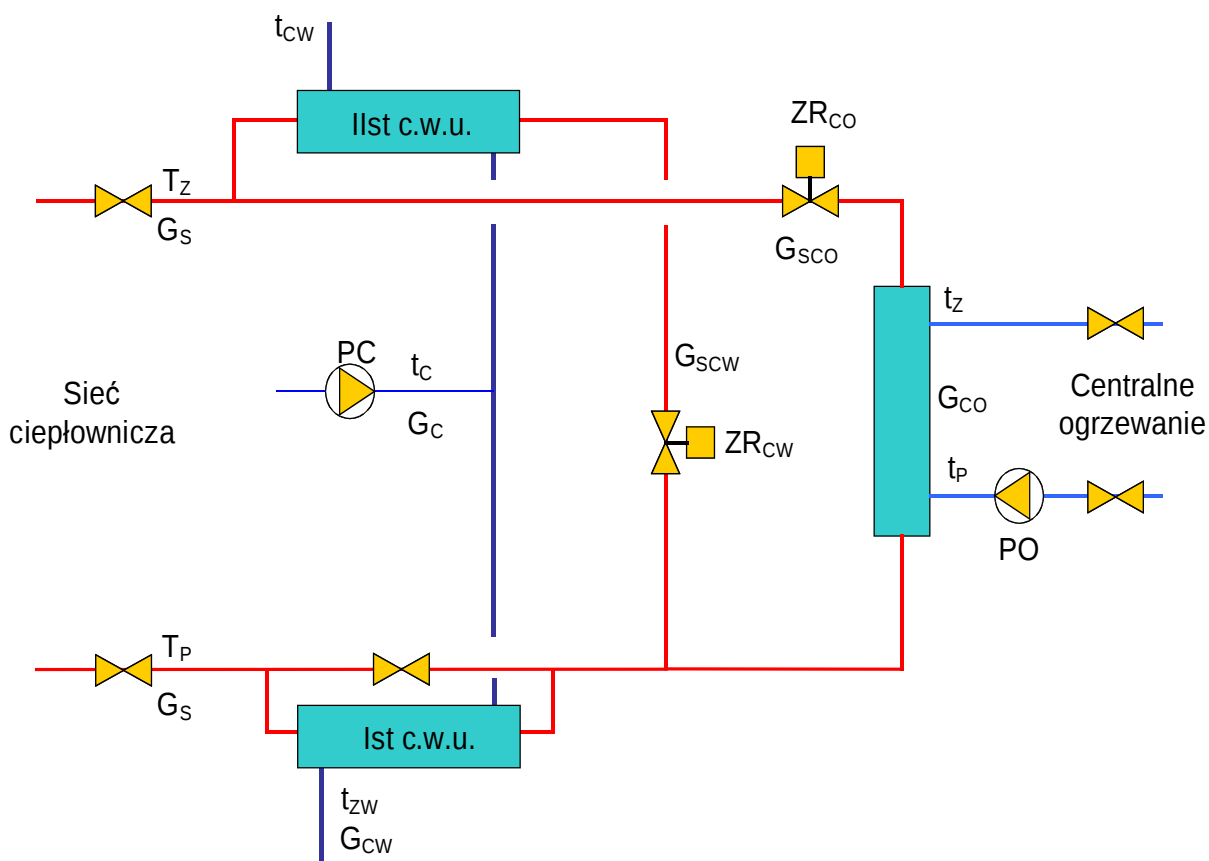
Program symulacyjny może zostać wykorzystany przy analizowaniu pracy węzłów ciepłowniczych (np. określenie mocy poszczególnych stopni wymienników c.w.u., analiza zmiany przepływów w węźle ciepłowniczym przy zmianie wykresu regulacyjnego w źródle ciepła) lub też analizie pracy sieci ciepłowniczej (określenie przepływów wody sieciowej dla fragmentu sieci ciepłowniczej przy znanej strukturze węzłów ciepłowniczych).

7.Przykładowe symulacje pracy węzłów ciepłowniczych

7.1 Wpływ strumienia wody cyrkulacyjnej na pracę węzła ciepłowniczego na przykładzie węzła szeregowo-równoległego dla wielorodzinnego budynku mieszkalnego

Poniższa symulacja ma za zadanie określenie wpływu instalacji cyrkulacyjnej na pracę węzła ciepłowniczego oraz sprawdzenie czy możliwe jest uproszczenie analiz węzłów ciepłowniczych poprzez pominięcie wpływu instalacji cyrkulacyjnej na pracę węzła ciepłowniczego.

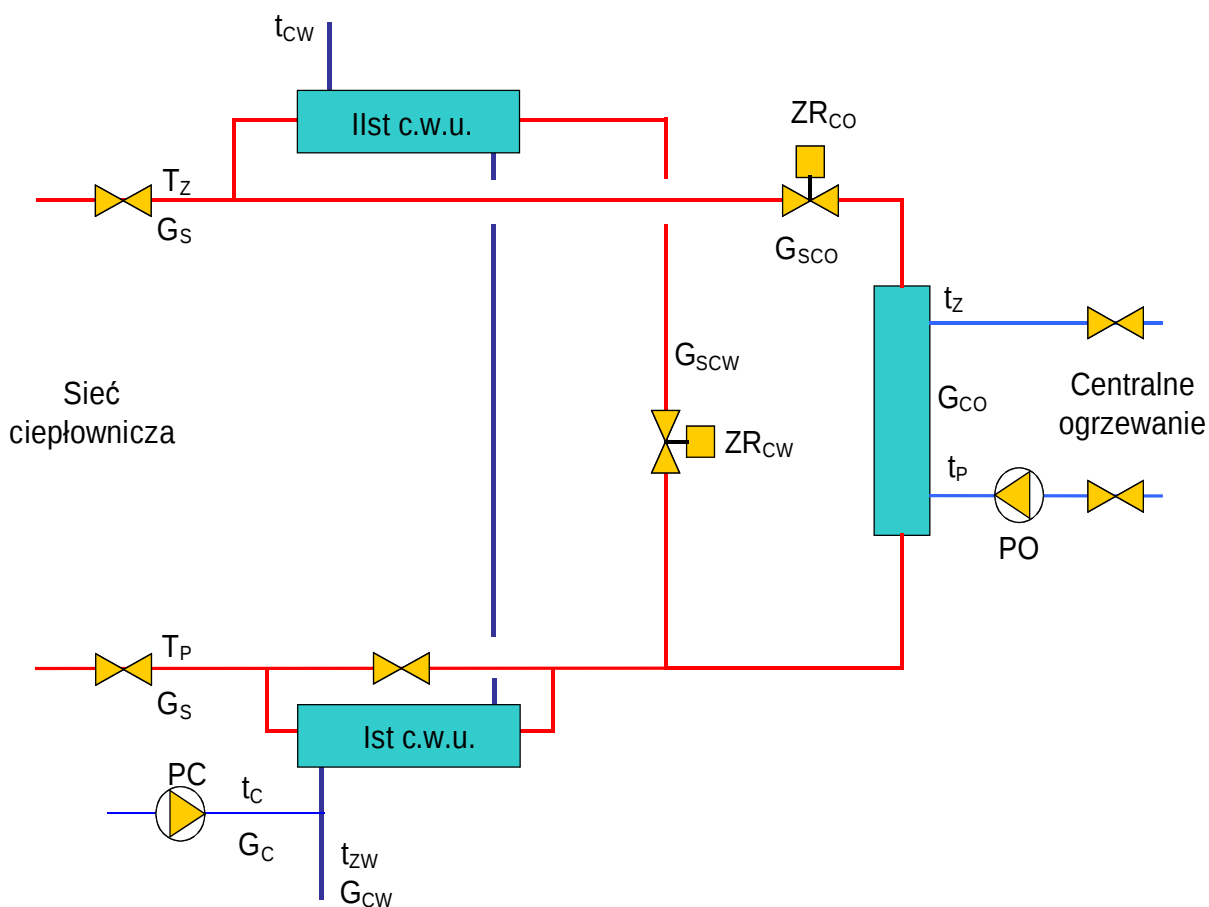
W węzłach ciepłowniczych dla wielorodzinnych budynków mieszkalnych pompa cyrkulacyjna zazwyczaj pracuje całą dobę (nie jest stosowany żaden układ sterowania pompą cyrkulacyjną). Najczęściej spotykanym sposobem włączenia instalacji cyrkulacyjnej w węźle szeregowo-równoległym jest wpięcie jej pomiędzy stopniami wymiennika (rysunek 14). Konsekwencją takiego rozwiązania jest całoroczna potrzeba utrzymywania przepływu wody sieciowej przez II stopień c.w.u. przy braku rozbioru ciepłej wody.



Rysunek 14: Węzeł szeregowo-równoległy ze standardowym włączeniem instalacji cyrkulacyjnej

Na rysunku 15 przedstawiono węzeł szeregowo-równoległy z włączeniem cyrkulacji przed I-szym stopniem c.w.u.

Dzięki takiemu rozwiązaniu można zmniejszyć (przy $T_{pc} \gg t_{cw}$ wyeliminować) dodatkowy strumień wody sieciowej na podgrzanie wody cyrkulacyjnej przy temperaturach wody sieciowej powracającej z układu c.o. wyższych od temperatury powrotu wody z instalacji cyrkulacyjnej. Stosowanie takiego układu może być również korzystne w przypadku gdy w węźle ciepłowniczym mamy duże zapotrzebowanie na c.w.u. przy znikomym zapotrzebowaniu na pokrycie strat cyrkulacji. Zastosowanie włączenia cyrkulacji przed I-szym stopniem może wyeliminować wówczas potrzebę stosowania dodatkowego wymiennika (i układu regulacji) wyłącznie na pokrycie strat instalacji cyrkulacyjnej. Wadą takiego układu jest zwiększenie poboru ciepła w węźle ciepłowniczym w przypadku wzrostu temperatury wody cyrkulacyjnej za pierwszym stopniem powyżej wymaganej temperatury c.w.u. spowodowanej brakiem regulacji przepływu wody sieciowej przez I-szy stopień oraz jak przedstawiono w dalszej części opracowania wzrost temperatury powrotu wody sieciowej z węzła ciepłowniczego.



Rysunek 15: Węzeł szeregowo-równoległy z włączeniem instalacji cyrkulacyjnej przed I-szym stopniem

Konsekwencją pracy instalacji cyrkulacyjnej jest zwiększenie temperatury c.w.u. w miejscu włączenia instalacji cyrkulacyjnej, wzrost temperatury wody sieciowej powracającej z wymiennika c.w.u. (I-szego lub II-go stopnia) i zwiększenie strumienia wody sieciowej w stosunku do strumienia przy braku lub wyłączeniu instalacji cyrkulacyjnej.

Należy zwrócić uwagę iż, w przypadku braku poboru c.w.u. temperatura wody sieciowej powracającej z węzła ciepłowniczego będzie zawsze większa od temperatury wody powracającej z instalacji cyrkulacyjnej (niezależnie od miejsca włączenia instalacji cyrkulacyjnej).

Poniższa symulacja ma na celu zbadanie wpływu strumienia wody cyrkulacyjnej oraz miejsca włączenia instalacji cyrkulacyjnej na strumień wody sieciowej węzła szeregowo-równoległego.

7.1.1 Założenia

Do symulacji wybrano węzeł ciepłowniczy szeregowo – równoległy. Zasilany obiekt (trzy klatki budynku mieszkalnego 5-cio kondygnacyjnego) znajduje się w II-giej strefie klimatycznej, obliczeniowe zapotrzebowanie ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania wynosi 124,4 kW, obliczeniowe temperatury instalacji c.o. przyjęto 90/70°C, obliczeniowe temperatury wody sieciowej przyjęto jako 150/75 °C z ograniczeniami do 130 i 65°C. Obliczeniowy strumień c.w.u. wynosi 1.8 m³/h, co przy obliczeniowych temperaturach 10 i 55°C daje obliczeniowe zapotrzebowanie ciepła na c.w.u. (bez uwzględnienia cyrkulacji) 94 kW. Temperaturę powrotu wody cyrkulacyjnej założono jako wartość stałą wynoszącą 50°C (zgodnie z Polską Normą [21] założono $\Delta t=5^{\circ}\text{C}$ dla instalacji cyrkulacyjnej pompowej). W rzeczywistości temperatura wahałaby się w granicach 50-55°C.

Symulacja wykonana została dla dwóch wariantów węzła ciepłowniczego:

- 1) węzeł bazujący na 4 wymiennikach typu JAD3.18 (Ist 2×3.18, IIst 1×3.18, c.o. 1×3.18)
- 2) węzeł bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval.

Wymienniki dobrano zgodnie z zaleceniami zawartymi w wytycznych MPEC Wrocław (M. Zezula [8]). Dane opisujące dobrane wymienniki płytowe zestawiono w tabelach 1 do 3. Zmienność współczynnika k opisano współczynnikami aproksymowanymi na podstawie danych uzyskanych z analizy pracy poszczególnych wymienników (przy zmiennych parametrach wejściowych) wykonanej w programie CAS200 f-my Alfa Laval.

Tabela 1: Dane wymiennika c.o.

Alfa Laval CB27 (Cetetherm 610-80) 80 płyt, powierzchnia efektywna 1,950m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
4354	0,520	1,490	5309	0,536766	0,095912	3883	10,8%	0,985223
3632	0,412	1,490				3427	5,6%	
3430	0,416	1,490				3445	-0,4%	
2466	0,225	1,489				2477	-0,4%	
4348	0,560	1,242				3969	8,7%	
3472	0,388	1,244				3260	6,1%	
3174	0,372	1,239				3185	-0,3%	
2270	0,191	1,238				2226	1,9%	

Tabela 2: Dane wymiennika c.w.u. II-go stopnia – węzeł szeregowo-równoległy

Alfa Laval M6M (Cetetherm CT210 GP) 11 płyt, powierzchnia efektywna 1,260m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
4037	0,534	0,512	6189	0,370135	0,256722	4133	-2,4%	0,997879
3717	0,407	0,512				3737	-0,5%	
4285	0,592	0,513				4296	-0,3%	
2593	0,157	0,513				2626	-1,3%	
3026	0,237	0,513				3058	-1,1%	
3136	0,230	0,700				3275	-4,4%	
4272	0,474	0,700				4283	-0,3%	
2477	0,201	0,327				2565	-3,6%	
2519	0,208	0,287				2514	0,2%	
2506	0,232	0,240				2496	0,4%	

Tabela 3: Dane wymiennika c.w.u. I-go stopnia – węzeł szeregowo-równoległy

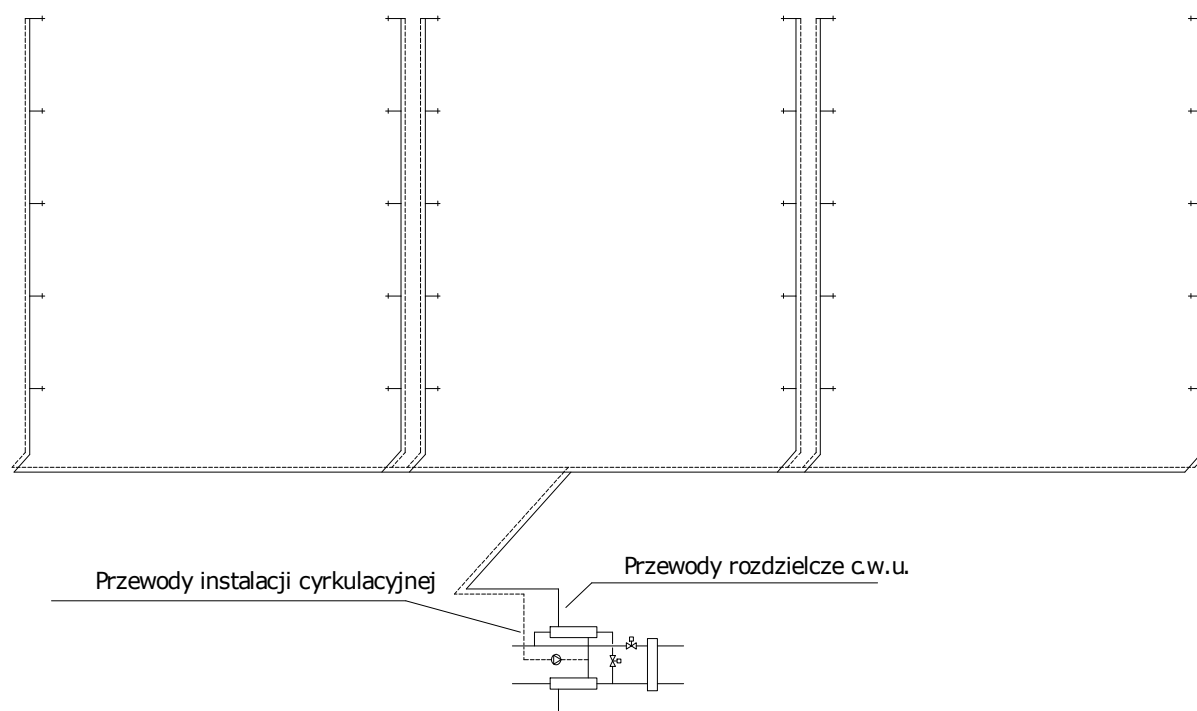
Alfa Laval M6M (Cetetherm CT210 GP) 11 płyt, powierzchnia efektywna 1,260m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
3243	0,470	0,469	5167	0,342131	0,273095	3245	-0,1%	0,974177
3282	0,447	0,513				3269	0,4%	
2001	0,189	0,251				2004	-0,1%	
2340	0,419	0,164				2343	-0,1%	
4696	0,860	0,515				4094	12,8%	
3111	0,521	0,208				2692	13,5%	
2971	0,295	0,506				2825	4,9%	
4557	1,129	0,509				4478	1,7%	
3334	0,805	0,258				3316	0,5%	
4026	0,696	0,510				3797	5,7%	

7.1.2 Zmienność strumieni wody cyrkulacyjnej przy zmiennych udziałach ciepłej wody użytkowej

Znalezienie rzeczywistego punktu pracy pompy cyrkulacyjnej, a tym samym określenie przepływu wody cyrkulacyjnej polega na rozwiązaniu układu równań opisujących charakterystyki pompy oraz sieci przewodów. Sieć przewodów wchodzących w skład instalacji cyrkulacyjnej składa się dwóch części: przewodów rozdzielczych c.w.u. oraz przewodów cyrkulacji (rysunek 16).

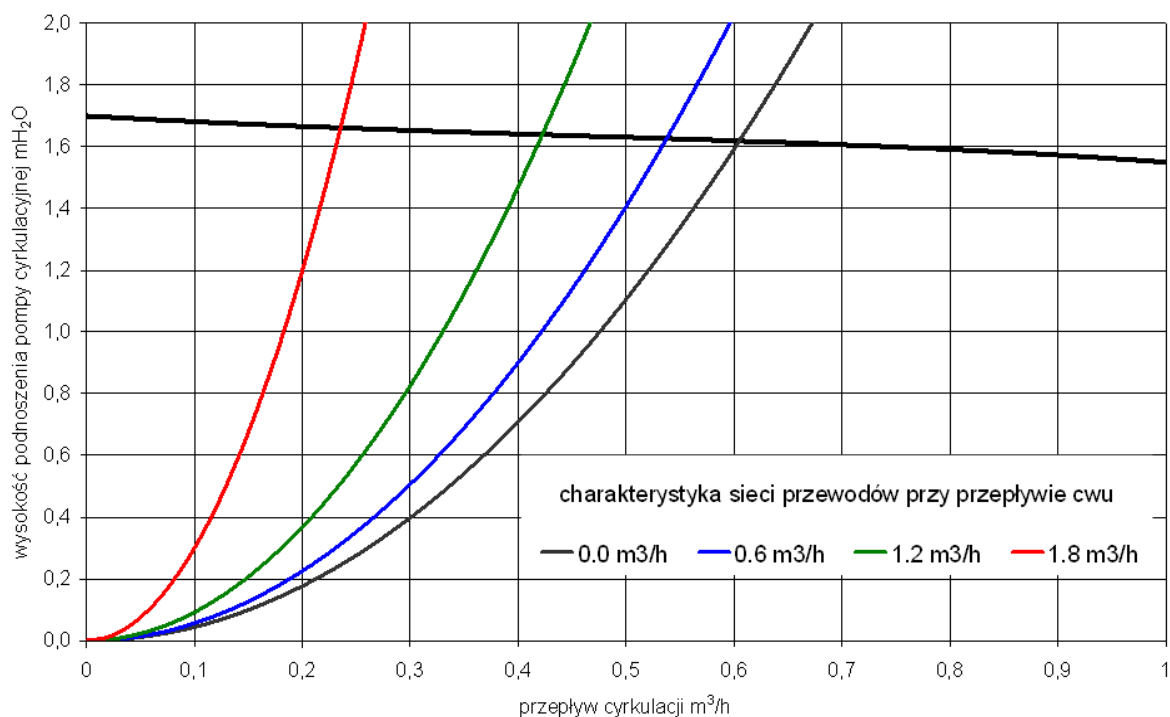
Charakterystykę instalacji cyrkulacyjnej możemy opisać jako sumę oporności wyżej wymienionych fragmentów instalacji. Przy analizie hydraulicznej takiego układu należy zwrócić uwagę na to, że zmienność przepływów ciepłej wody użytkowej w przewodach rozdzielczych wpływa na straty ciśnienia w tej części instalacji a tym samym zmienia oporność łączną instalacji cyrkulacyjnej. Charakterystyka sieci przewodów zależy od proporcji przepływów pomiędzy poszczególnymi częściami instalacji, pośrednio zatem od charakterystyki dobranej pompy cyrkulacyjnej.

Na potrzeby niniejszej symulacji wykonano analizę pracy zaprojektowanej dla niniejszego modelu budynku instalacji cyrkulacyjnej z wariantowym doбором pomp cyrkulacyjnych (UP 25-25 oraz UP 20-30N firmy Grundfos). Obliczeniowy strumień wody cyrkulacyjnej wynosi 0.54 m³/h, łączne straty w instalacji cyrkulacyjnej wynoszą 1.3 m H₂O. Przewody instalacji rozdzielczej oraz cyrkulacyjnej c.w.u. wykonaną z polietylenu dobrano zgodnie z Polską Normą [21].

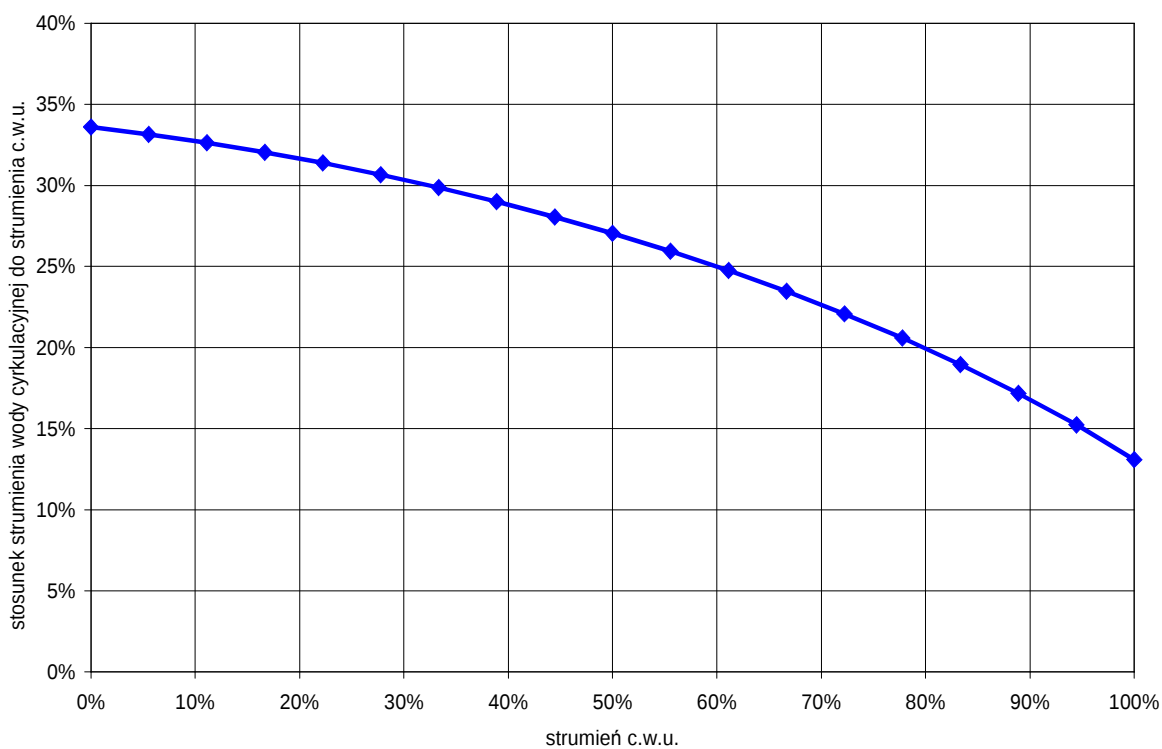


Rysunek 16: Schemat instalacji c.w.u.

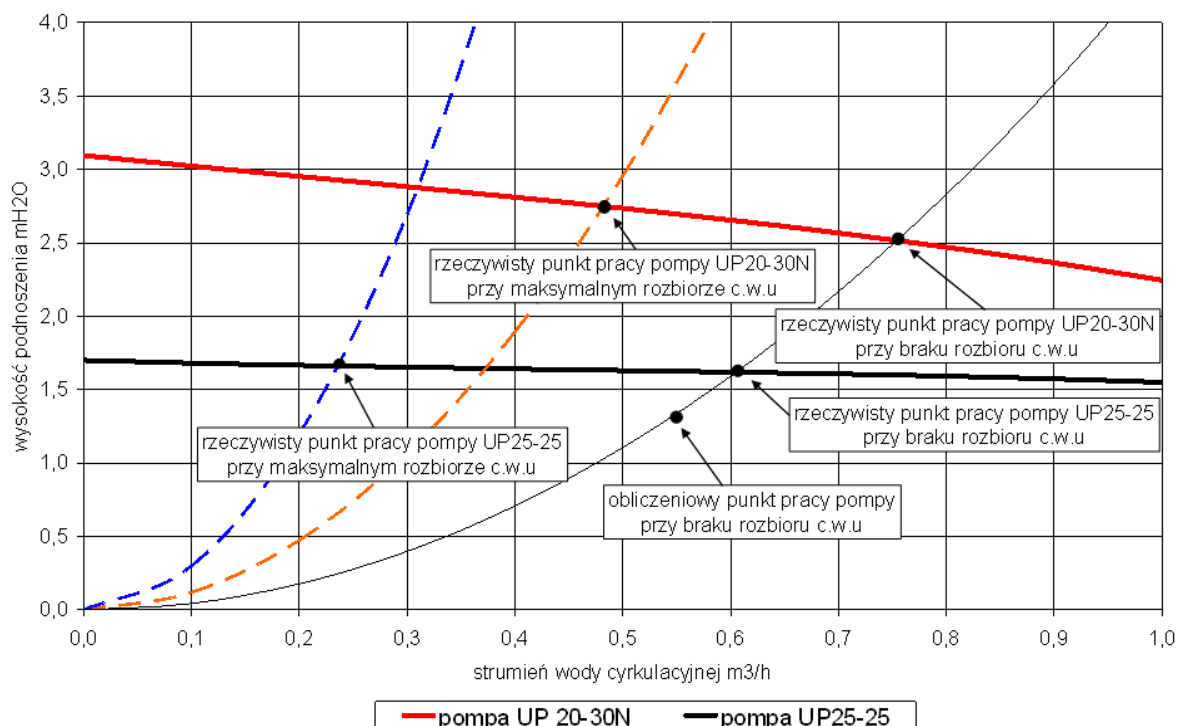
Na rys. 17 przedstawiono zmianę przepływu wody cyrkulacyjnej przy zmiennych poborach c.w.u. oraz zmianę przepływu wody cyrkulacyjnej w funkcji strumienia c.w.u (rys.18). (zastosowana pompa UP 25-25). Na rys. 19 przedstawiono zmianę przepływu wody cyrkulacyjnej w dwóch wariantach doboru pomp cyrkulacyjnych. Obliczenia wykonano przy założeniu proporcjonalnego rozpływu strumieni c.w.u. i cyrkulacji. Rzeczywiste punkty pracy pomp cyrkulacyjnych uzyskano metodą kolejnych przybliżeń.



Rysunek 17: Przepływ wody cyrkulacyjnej przy zmiennych poborach c.w.u. (pompa UP 25-25)



Rysunek 18: Zmiana przepływu wody cyrkulacyjnej w funkcji strumienia c.w.u. (pompa UP 25-25)



Rysunek 19: Przepływ wody cyrkulacyjnej przy zmiennych poborach c.w.u. (wariantowy dobór pomp)

W przypadku pompy UP 25-25 strumień wody cyrkulacyjnej przy maksymalnym rozbiorze c.w.u. spadł do 39% strumienia obliczeniowego, dla pompy UP20-30N spadł do 64% strumienia obliczeniowego. Strumienie te stanowią odpowiednio 13% i 27% obliczeniowego strumienia c.w.u.

7.1.3 Określenie strumieni wody sieciowej dla węzła ciepłowniczego przy różnych udziałach wody cyrkulacyjnej

Symulacje wykonano dla dwóch wariantów włączenia instalacji cyrkulacyjnej:

- wariant 1 - przed drugim stopniem c.w.u. – rys. 14,
- wariant 2 - przed pierwszym stopniem c.w.u – rys. 15.

Wyniki obliczeń dla poszczególnych wariantów zestawiono w postaci wykresów – rysunki 20 do 27 – obrazujących zmianę strumienia wody sieciowej w sezonie grzewczym przy różnych udziałach strumienia cyrkulacyjnego w maksymalnym obliczeniowym strumieniu c.w.u.

Uwaga!:

Na zmiany strumieni wody sieciowej wykazanych na poniższych wykresach wpływ ma również obliczeniowa zmiana zapotrzebowania ciepła na pokrycie strat ciepła instalacji cyrkulacyjnej wynikającej z przyjętej różnicy temperatur wody cyrkulacyjnej i ciepłej wody użytkowej.

Przy włączeniu instalacji cyrkulacyjnej przed drugim stopniem - wariant 1 (rys. 20 i 21 węzeł bazujący na wymiennikach płytowych) maksymalne zmiany strumienia wody sieciowej wynoszą odpowiednio:

dla temperatury cyrkulacji 55°C: 102.6% (10% udziału cyrkulacji), 104.0% (20% udziału cyrkulacji), 106.0% (30% udziału cyrkulacji), 106.6% (40% udziału cyrkulacji), 108.0% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

dla temperatury cyrkulacji 50°C: 104.0% (10% udziału cyrkulacji), 106.0% (20% udziału cyrkulacji), 110.0% (30% udziału cyrkulacji), 112.0% (40% udziału cyrkulacji), 116.0% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

Przy włączeniu instalacji cyrkulacyjnej przed drugim stopniem - wariant 1 (rys. 24 i 25 węzeł bazujący na wymiennikach JAD) maksymalne zmiany strumienia wody sieciowej wynoszą odpowiednio:

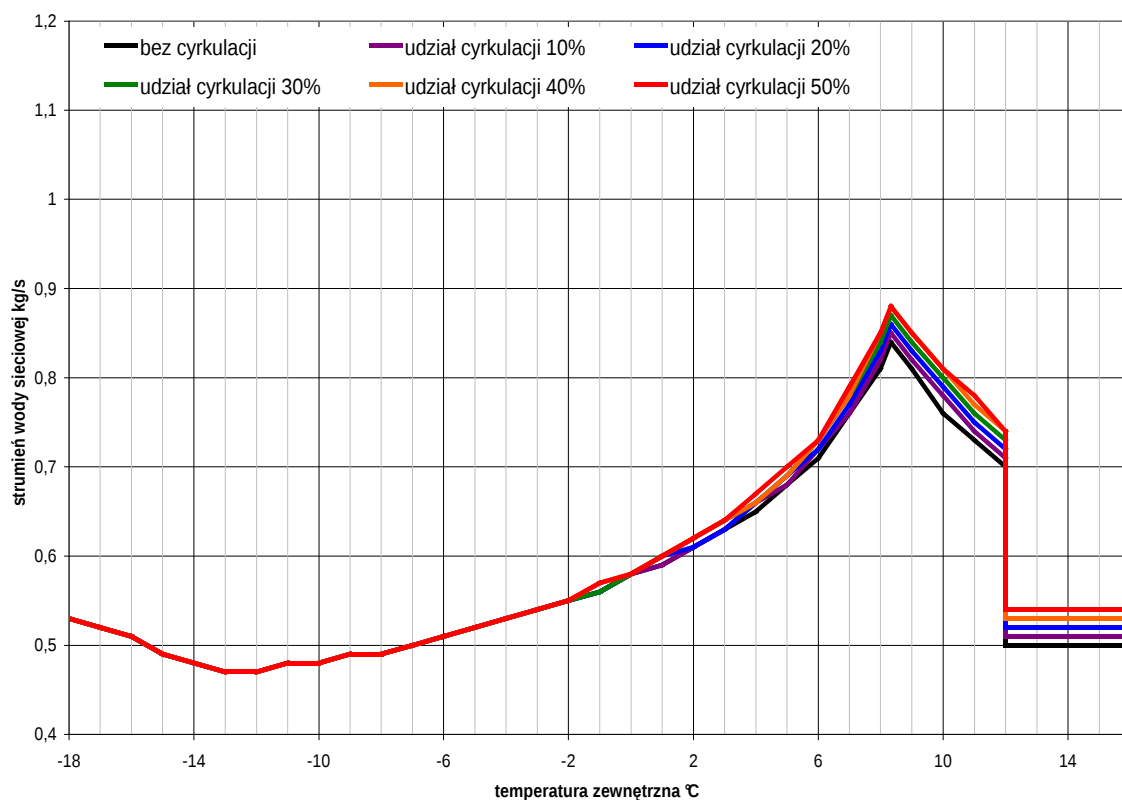
dla temperatury cyrkulacji 55°C: 102.3% (10% udziału cyrkulacji), 103.4% (20% udziału cyrkulacji), 104.6% (30% udziału cyrkulacji), 105.7% (40% udziału cyrkulacji), 107.3% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

dla temperatury cyrkulacji 50°C: 103.4.0% (10% udziału cyrkulacji), 105.7% (20% udziału cyrkulacji), 109.1% (30% udziału cyrkulacji), 112.7% (40% udziału cyrkulacji), 116.0% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

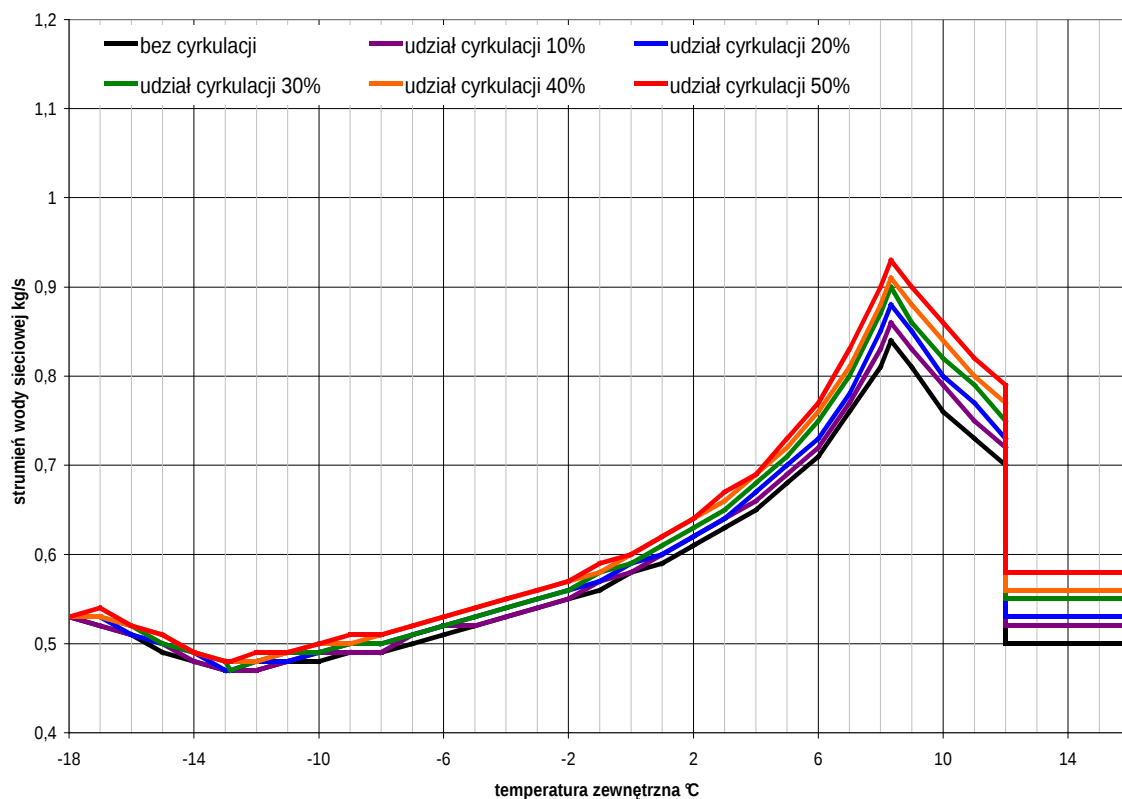
Przy włączeniu instalacji cyrkulacyjnej przed pierwszym stopniem - wariant 2 (rys. 22 i 23 węzeł bazujący na wymiennikach płytowych) maksymalne zmiany strumienia wody sieciowej wynoszą odpowiednio:

dla temperatury cyrkulacji 55°C: 108.0% (10% udziału cyrkulacji), 114.0% (20% udziału cyrkulacji), 122.0% (30% udziału cyrkulacji), 128.0% (40% udziału cyrkulacji), 134.0% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

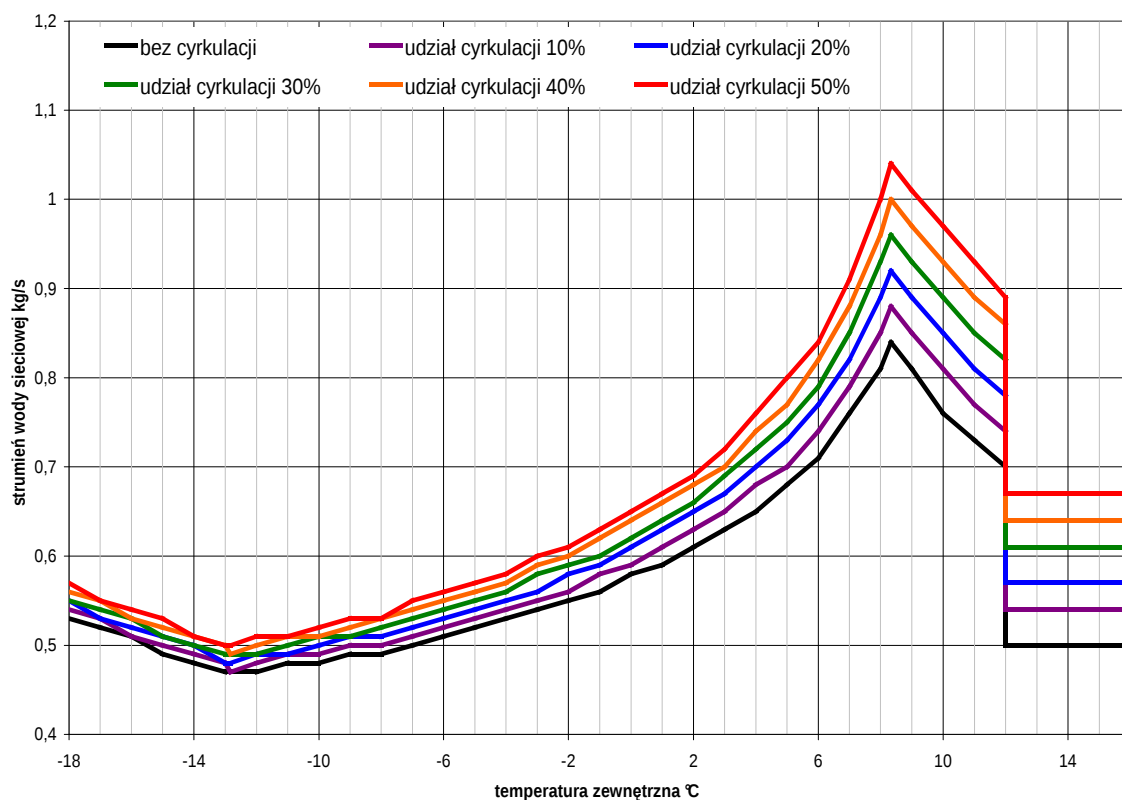
dla temperatury cyrkulacji 50°C: 108% (10% udziału cyrkulacji), 116% (20% udziału cyrkulacji), 124% (30% udziału cyrkulacji), 132% (40% udziału cyrkulacji), 138% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.



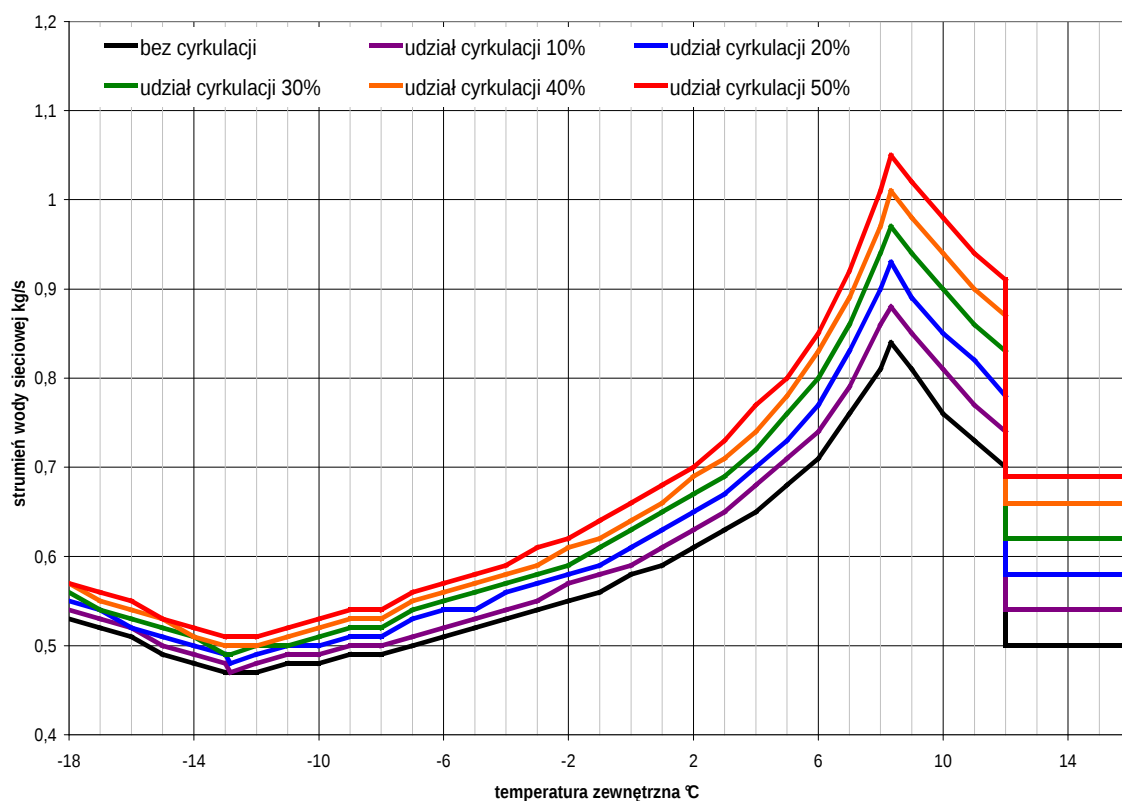
Rysunek 20: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wymienniki płytowe, instalacja cyrkulacyjna przed II-gim st.) $t_c=55^\circ\text{C}$



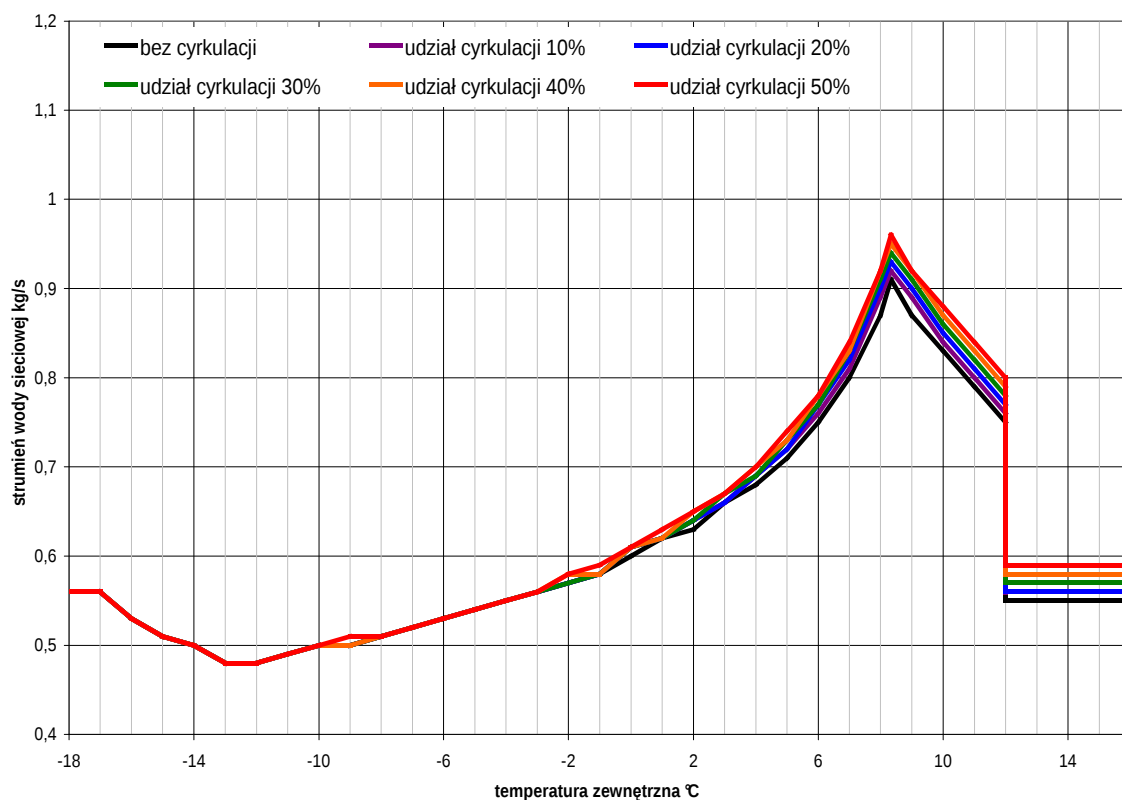
Rysunek 21: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wymienniki płytowe, instalacja cyrkulacyjna przed II-gim st.) $t_c=50^\circ\text{C}$



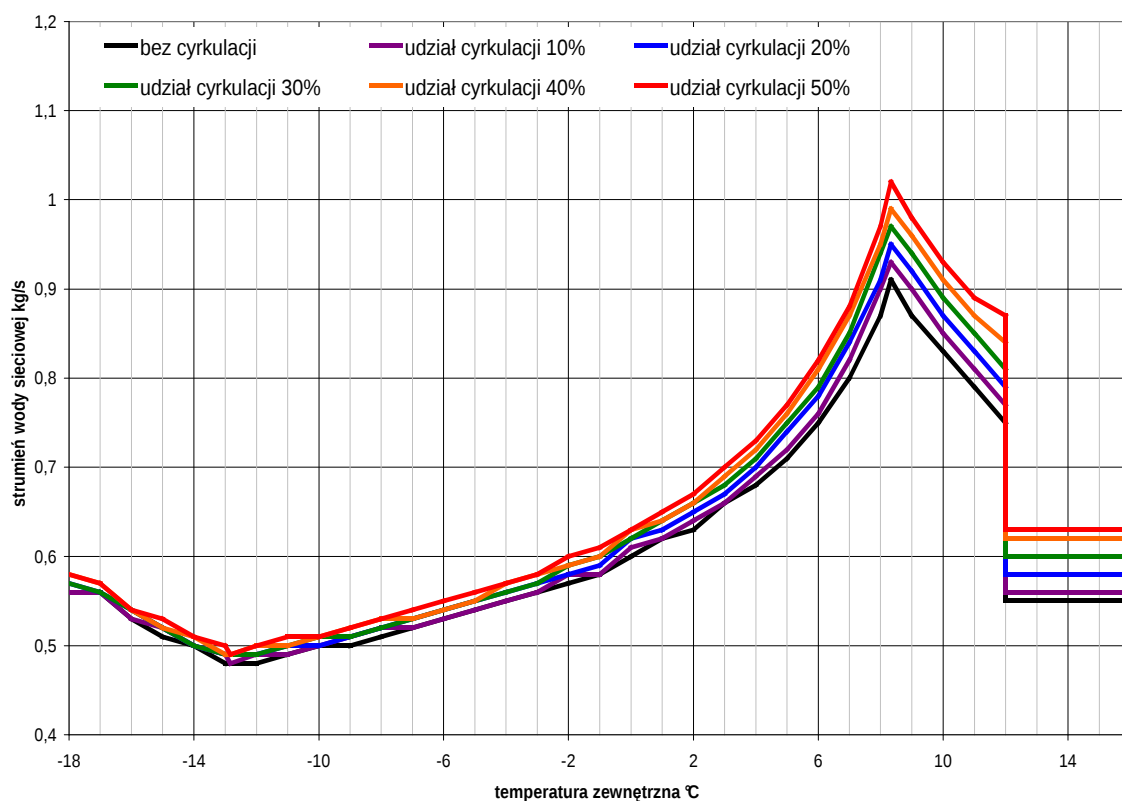
Rysunek 22: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wymienniki płytowe, instalacja cyrkulacyjna przed I-szym st.) $t_c=55^{\circ}\text{C}$



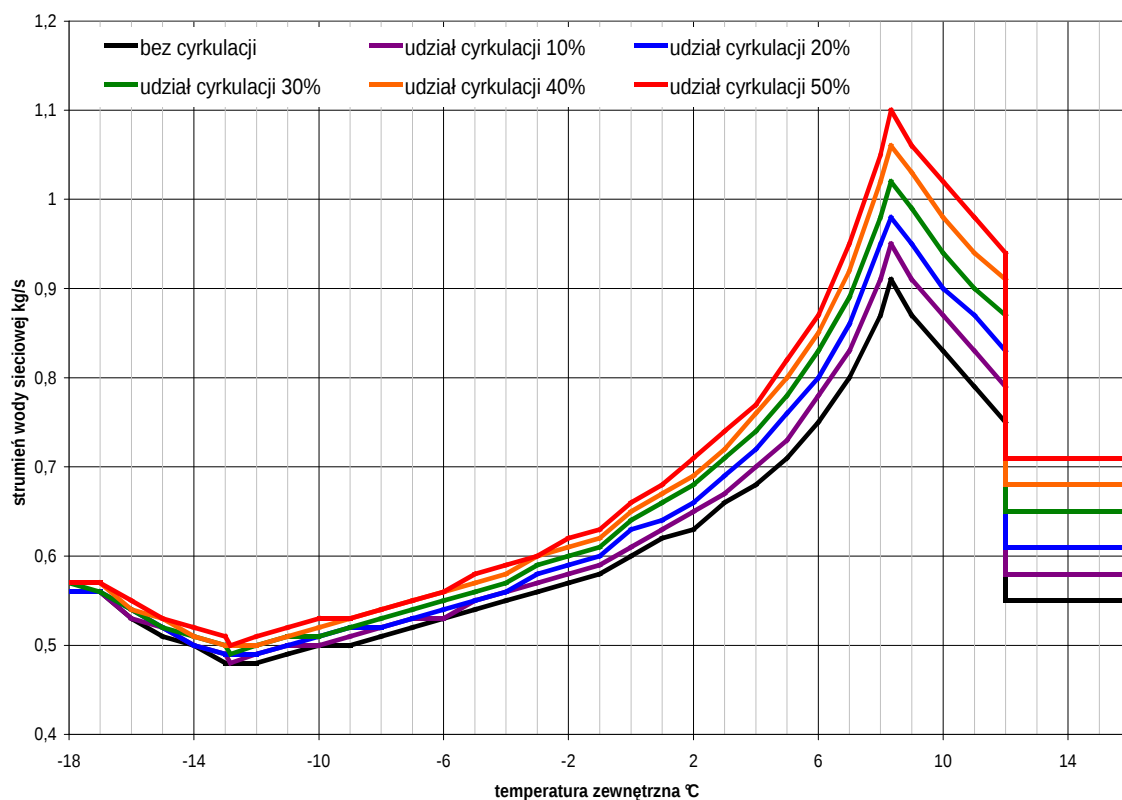
Rysunek 23: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wymienniki płytowe, instalacja cyrkulacyjna przed I-szym st.) $t_c=50^{\circ}\text{C}$



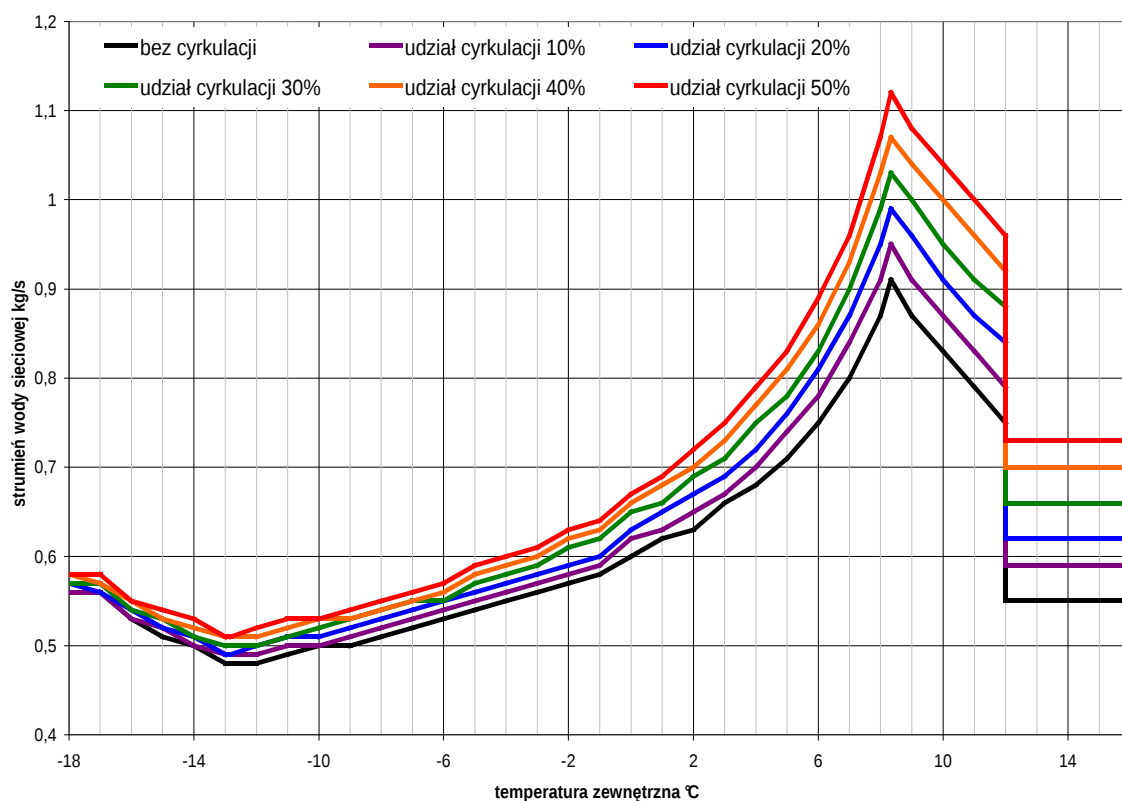
Rysunek 24: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wyminienniki JAD, instalacja cyrkulacyjna przed II-gim st.) $t_c=55^\circ\text{C}$



Rysunek 25: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wyminienniki JAD, instalacja cyrkulacyjna przed II-gim st.) $t_c=50^\circ\text{C}$



Rysunek 26: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wyminienniki JAD, instalacja cyrkulacyjna przed I-szym st.) $t_c=55^\circ\text{C}$



Rysunek 27: Zmiana strumienia wody sieciowej przy różnych udziałach cyrkulacji (wyminienniki JAD, instalacja cyrkulacyjna przed I-szym st.) $t_c=50^\circ\text{C}$

Przy włączeniu instalacji cyrkulacyjnej przed pierwszym stopniem - wariant 2 (rys. 26 i 27 węzeł bazujący na wymiennikach JAD) maksymalne zmiany strumienia wody sieciowej wynoszą odpowiednio:

dla temperatury cyrkulacji 55°C: 105.5% (10% udziału cyrkulacji), 110.9% (20% udziału cyrkulacji), 118.2% (30% udziału cyrkulacji), 123.6% (40% udziału cyrkulacji), 129.1% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

dla temperatury cyrkulacji 50°C: 107.3% (10% udziału cyrkulacji), 112.7% (20% udziału cyrkulacji), 120.0% (30% udziału cyrkulacji), 127.3% (40% udziału cyrkulacji), 132.7% (50% udziału cyrkulacji) strumienia wody sieciowej z cyrkulacją w stosunku do strumienia wody sieciowej bez uwzględnienia cyrkulacji.

7.1.4 Wnioski

1. Najczęstszym błędem jest przyjmowanie całkowitego “wygaszenia” pracy instalacji cyrkulacyjnej przy maksymalnych rozbiorach ciepłej wody użytkowej. Analizę pracy węzła ciepłowniczego dla obiektu z instalacją cyrkulacyjną powinno wykonywać się przy uwzględnieniu pracy tej instalacji.
2. Przewymiarowanie pompy cyrkulacyjnej powoduje zwiększenie udziału strumienia wody cyrkulacyjnej w strumieniu ciepłej wody użytkowej. Jego konsekwencją jest wzrost strumienia wody sieciowej w węzłach ciepłowniczych. W przypadku zastosowania w węzłach ograniczników przepływu powoduje to w rzeczywistości dodatkowe zaniżenie dostawy ciepła na c.o. w stosunku do rzeczywistych potrzeb.
3. Największe zmiany strumienia występują na końcu sezonu grzewczego i w okresie letnim (przy najniższych temperaturach wody sieciowej (65°C))
4. W węzłach ciepłowniczych z instalacją cyrkulacyjną włączoną pomiędzy stopniami c.w.u. (wariant 1) wpływ zwiększonego strumienia cyrkulacyjnego jest mniejszy niż w przypadku węzłów z instalacją cyrkulacyjną włączoną przed pierwszym stopniem (wariant 2).
5. Przy projektowaniu węzłów ciepłowniczych należy zwrócić większą uwagę na prawidłowy dobór pompy cyrkulacyjnej i w miarę możliwości dobierać pompy o płaskiej charakterystyce.
6. W przypadku zdiagnozowania nieprawidłowej pracy instalacji cyrkulacyjnej poprawa jej działania powinna polegać na regulacji i dostosowaniu strumienia wody cyrkulacyjnej do rzeczywistych potrzeb.
7. Wpływ instalacji cyrkulacyjnej w węźle ciepłowniczym można określić poprzez obserwację zmian strumienia wody sieciowej przy wymuszeniu zmiany strumienia wody cyrkulacyjnej.

7.2 Porównanie pracy węzłów równoległego i pierwszostopniowego dla domu jednorodzinnego

Celem symulacji było sprawdzenie warunków pracy węzła “pierwszostopniowego” w wersji 1, oszacowanie niezbędnego do prawidłowej pracy układu obliczeniowego strumienia wody sieciowej oraz porównanie jego pracy z węzłem równoległym.

7.2.1 Założenia

Symulacje zostały wykonane przy parametrach obliczeniowych węzła: $Q_{obl}^{co} = 14 \text{ kW}$, $\dot{m}_{c.w.u.}^{maxh} = 0.15 \text{ kg/s}$ (co przy parametrach c.w.u. 55/10°C odpowiada mocy 28,3kW).

W symulacjach założono brak instalacji cyrkulacyjnej w obiekcie. W symulacji założono teoretyczny wykres regulacyjny jakościowo-ilościowy wody sieciowej 150/75 z ograniczeniami do 130 i 65°C, oraz jakościowy wykres regulacyjny wody instalacyjnej instalacji centralnego 90/70°C.

Ze względu na na identycznie przyjęte warunki obliczeniowe do doboru wymienników ciepła (wymiennik c.o. - dobrany dla parametrów temperatury zewnętrznej obliczeniowej, wymiennik c.w.u. - dobrany dla okresu letniego) oba typy węzłów ciepłowniczych będą bazowały na tych samych wymiennikach ciepła. Do symulacji przyjęto wymienniki płytowe firmy Alfa Laval typ CB20, których pracę symulowano z wykorzystaniem aproksymacji współczynnika k. Dane do obliczeń zawarto w: tabela 4 – dane wymiennika c.o., tabela 5 – dane wymiennika c.w.u.)

Tabela 4: Dane wymiennika c.o.

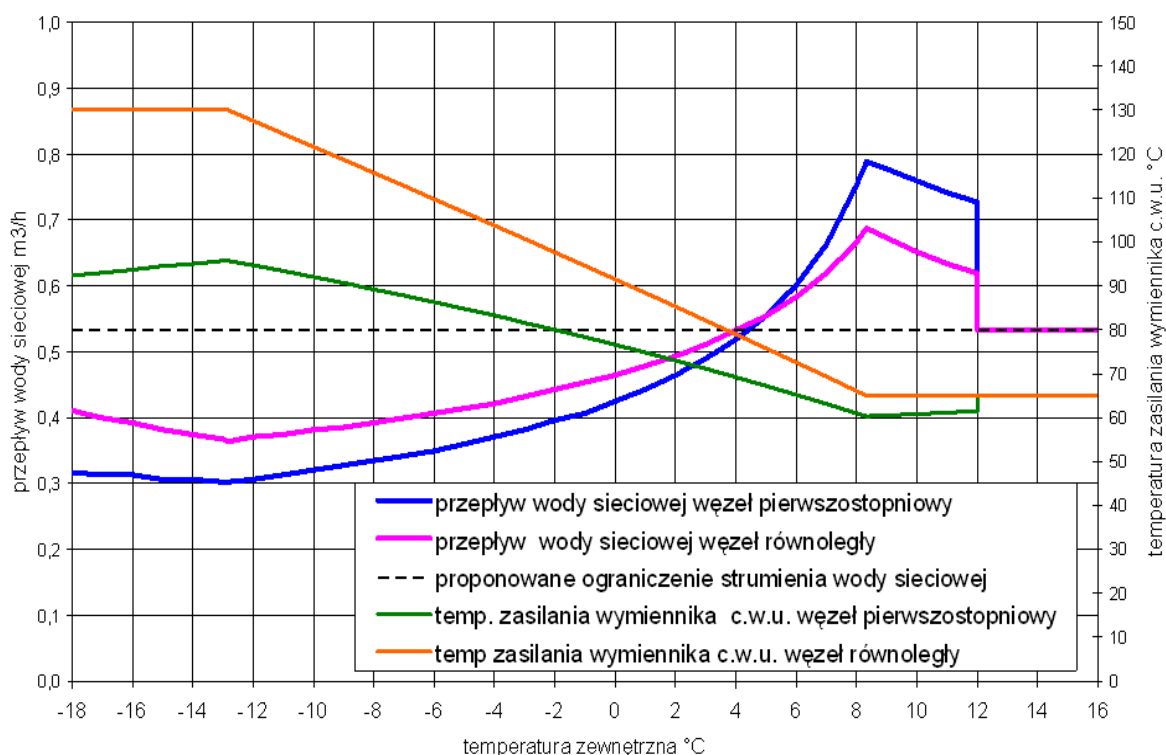
AlfaLaval CB20 12 płyt, powierzchnia efektywna 0.23m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
5736	0,056	0,167	19416	0,4490	0,0485	4892	14,7%	0,970
5087	0,045	0,167				4410	13,3%	
4811	0,045	0,167				4435	7,8%	
4522	0,045	0,167				4440	1,8%	
3406	0,025	0,167				3406	0,0%	
3045	0,020	0,135				3045	0,0%	
3970	0,036	0,135				3970	0,0%	

Tabela 5: Dane wymiennika c.w.u.

AlfaLaval CB20 23 płyt, powierzchnia efektywna 0.483m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
4695	0,168	0,150	14947	0,4522	0,1697	4830	-2,9%	0,998
2860	0,070	0,070				2860	0,0%	
3651	0,091	0,150				3665	-0,4%	
2212	0,041	0,070				2245	-1,5%	
2966	0,057	0,150				2966	0,0%	
1837	0,026	0,070				1837	0,0%	

7.2.2 Wyniki symulacji

Wyniki symulacji przedstawiono w formie wykresu obrazującego zmiany strumienia wody sieciowej oraz temperatury zasilania wymiennika c.w.u. w funkcji temperatury zewnętrznej (rys. 28).



Rysunek 28: Zmienność strumienia wody sieciowej oraz temperatury zasilania wymiennika c.w.u. w funkcji temperatury zewnętrznej

Na podstawie symulacji można stwierdzić, iż największy strumień wody sieciowej dla obydwu typów węzłów (bez uwzględnienia możliwości zastosowania priorytetu c.w.u.) występuje przy załamaniu wykresu regulacyjnego. Wymagany strumień wody sieciowej dla węzła pierwszostopniowego jest dla załamania wykresu o 15% większy od strumienia dla węzła równoległego. Przy wykorzystaniu priorytetu c.w.u. całkowity strumień wody sieciowej można ograniczyć do strumienia wody sieciowej dla okresu letniego (na wykresie $0.54\text{m}^3/\text{h}$). Przy tak ustawionym w ograniczniku przepływu strumieniu wody sieciowej priorytet będzie wykorzystywany w obu typach węzłów ciepłowniczych powyżej temperatury zewnętrznej $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wysokość (głębokość) priorytetu w węźle pierwszostopniowym będzie większa niż w przypadku węzła równoległego. Możliwe jest zastosowanie układu ręcznego lub automatycznego przełączania konfiguracji węzła z pierwszostopniowego na równoległy w celu ograniczenia wysokości priorytetu. W przypadku domu jednorodzinnego, gdy bez ograniczenia komfortu dostawy ciepła można stosować pełny priorytet c.w.u. (czasowe zamknięcie zaworu ZR_{CO}) takie działanie wydaje się jednak zbędne.

Przy zastosowaniu węzła pierwszostopniowego uzyskujemy w okresie do temperatury $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ strumień wody sieciowej niższy niż w przypadku węzła równoległego przy jednoczesnym dodatkowym obniżeniu temperatury wody sieciowej powracającej do sieci ciepłowniczej w przypadku poboru wody użytkowej.

Temperatura zasilania wymiennika c.w.u. w przypadku węzła pierwszostopniowego jest niższa niż w węźle równoległym o maksymalnie $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ze względu na jej obniżenie możemy spodziewać się większej „żywności” zastosowanego wymiennika c.w.u.

Przy zastosowaniu każdego z analizowanych węzłów ciepłowniczych należy zwrócić uwagę na duże różnice w wymaganym strumieniu wody sieciowej kierowanym na wymiennik c.w.u. na początku i końcu sezonu grzewczego. Przy tak dużych różnicach należy liczyć się z możliwością dwustawnej pracy zaworu regulacyjnego c.w.u. przy niskich temperaturach zewnętrznych. W przypadku węzła pierwszostopniowego ze względu na wykorzystanie strumienia wody sieciowej powracającej z układu c.o. powinniśmy jednak uzyskać mniejsze wahania temperatury c.w.u.

W węzłach pierwszostopniowych dla domów jednorodzinnych z instalacją cyrkulacyjną, przy zastosowaniu w układzie automatycznej regulacji czujnika przepływu umieszczonego na przewodzie wody zimnej, możliwe jest uzyskanie stabilnej pracy układu cyrkulacji bez konieczności otwarcia zaworu ZR_{CW} (układ sterowania analogiczny do kotła dwufunkcyjnego dla domu jednorodzinnego). Należy przy tym zaznaczyć, że w takim przypadku temperatura wody cyrkulacyjnej będzie się zmieniała w sezonie grzewczym zgodnie z temperaturą wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o.

7.3 Porównanie pracy węzłów ciepłowniczych o różnych konfiguracjach dla budynku wielorodzinnego

Celem symulacji było sprawdzenie warunków pracy węzła “pierwszostopniowego”, oszacowanie niezbędnego do prawidłowej pracy układu obliczeniowego strumienia wody sieciowej oraz porównanie jego pracy z typowymi układami ciepłowniczymi (węzłem równoległym oraz szeregowo-równoległym)

7.3.1 Założenia

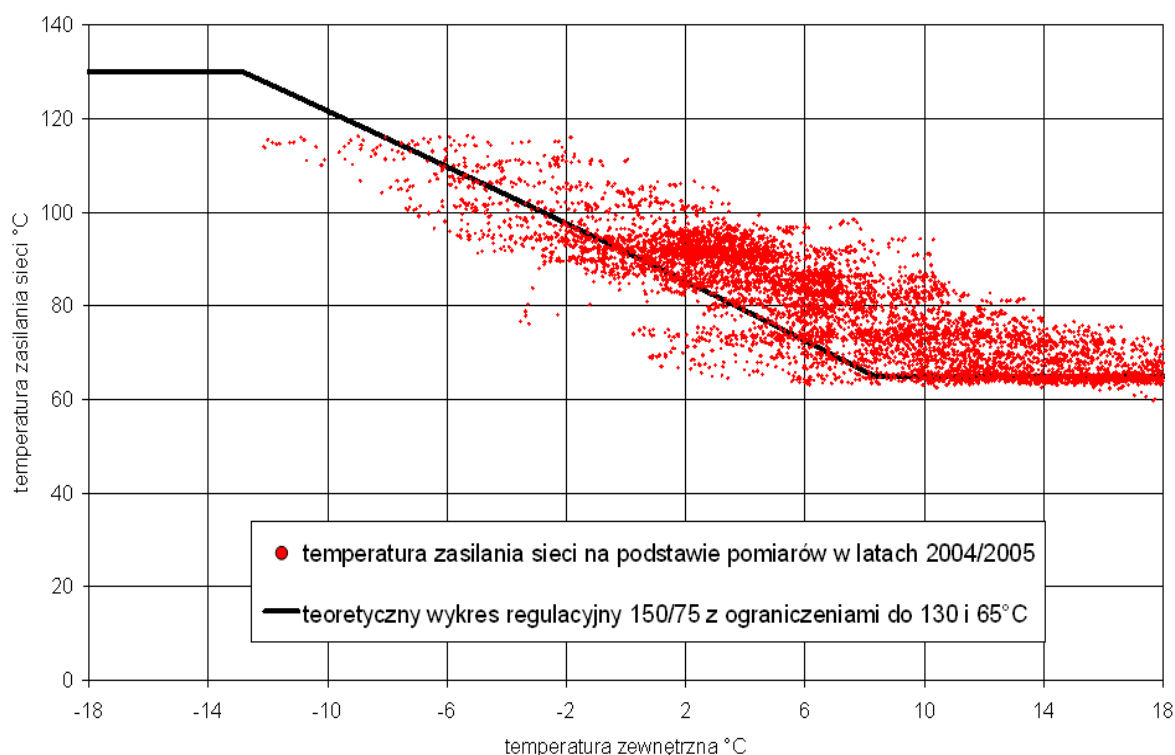
Symulacje pracy węzłów ciepłowniczych wykonano przy założeniu zgodności danych wejściowych z rzeczywistym węzłem badawczym zlokalizowanym we wrocławskim systemie ciepłowniczym. Dokładny opis węzła badawczego przedstawiono w następnym rozdziale.

Symulacje zostały wykonane przy parametrach obliczeniowych węzła: $Q_{obl}^{co} = 124.4 \text{ kW}$, $m_{cwu}^{maxh} = 0.5 \text{ kg/s}$ (co przy parametrach c.w.u. 52/10°C odpowiada mocy 88kW).

W symulacjach uwzględniono również wpływ zmiennego strumienia wody cyrkulacyjnej na pracę węzłów ciepłowniczych. Do obliczeń przyjęto zmienność strumienia wody cyrkulacyjnej dla pompy UP 25-25 przedstawionej na rysunku 18 w punkcie 7.1.2. Do symulacji przyjęto temperaturę powrotu cyrkulacji 47°C.

W symulacji założono teoretyczny wykres regulacyjny jakościowo-ilościowy wody sieciowej 150/75 z ograniczeniami do 130 i 65°C. Parametry wykresu są zgodne z rzeczywistym wykresem regulacyjnym wody sieciowej systemu ciepłowniczego we Wrocławiu. Na rysunku 29 przedstawiono porównanie rzeczywistych temperatur zasilania sieci ciepłowniczej w latach 2004/2005 z zastosowanym w symulacjach teoretycznym wykresem regulacyjnym. Wykres sporządzono na podstawie mierzonych w węźle Gliniana 75 chwilowych wartości temperatur zewnętrznej i zasilania sieci ciepłowniczej (z krokiem 1 godziny).

Podstawowym wykresem regulacyjnym wody instalacyjnej instalacji centralnego ogrzewania we Wrocławiu jest wykres jakościowy 90/70 i taki wykres przyjęto w symulacjach.



Rysunek 29: Porównanie rzeczywistych temperatur zasilania sieci ciepłowniczej w latach 2004/2005 z teoretycznym wykresem regulacyjnym

Symulacje wykonane zostały dla następujących wariantów węzła ciepłowniczego:

1. Węzeł szeregowo-równoległy z instalacją cyrkulacyjną wpiętą przed II-gi stopień:
 - bazujący na 3 wymiennikach typu JAD 3.18 (I-st 1×3.18, II-st 1×3.18, c.o. 1×3.18),
 - bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (I-st M6M-11, II-st M6M-11, c.o. CB27-80 obliczenia współczynnika k bazujące na wzorach kryterialnych),
 - bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (I-st M6M-11, II-st M6M-11, c.o. CB27-80 aproksymacja współczynnika k , dane do obliczeń w tabelach 1 do 3 strony 41 – 42).
2. Węzeł równoległy z instalacją cyrkulacyjną wpiętą przed wymiennik c.w.u.:
 - bazujący na 2 wymiennikach typu JAD 3.18 (c.w.u. 1×3.18, c.o. 1×3.18),
 - bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (c.w.u M6M-22, c.o. CB27-80 obliczenia współczynnika k bazujące na wzorach kryterialnych),
 - bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (c.w.u M6M-22, c.o. CB27-80 aproksymacja współczynnika k , dane do obliczeń: tabela 1 – wymiennik c.o. strona 41, tabela 6 - wymiennik c.w.u.).

Tabela 6: Dane wymiennika c.w.u. – węzeł równoległy

Alfa Laval M6M (Cetetherm CT210 GP) 22 płyt, powierzchnia efektywna 2.520m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
4092	0,547	0,564	6090	0,491347	0,177045	4092	0,0%	0,994
3928	0,468	0,558				3783	3,7%	
3251	0,338	0,565				3230	0,6%	
2852	0,293	0,358				2777	2,6%	
2748	0,255	0,363				2602	5,3%	
2433	0,223	0,363				2433	0,0%	
2395	0,184	0,565				2395	0,0%	
1353	0,091	0,363				1567	-15,8%	

3. Węzły “pierwszostopniowe” (w wersjach 1 i 2) z instalacją cyrkulacyjną wpiętą przed wymiennik c.w.u.:

- bazujące na 3 wymiennikach typu JAD 3.18 (c.w.u. 2×3.18, c.o. 1×3.18),
- bazujące na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (c.w.u M6M-22, c.o. CB27-80 obliczenia współczynnika k bazujące na wzorach kryterialnych),
- bazujący na wymiennikach płytowych firmy Alfa Laval (c.w.u M6M-22, c.o. CB27-80 aproksymacja współczynnika k, dane do obliczeń: tabela 1 – wymiennik c.o. strona 41, tabela 7 - wymiennik c.w.u.).

Tabela 7: Dane wymiennika c.w.u. – węzeł pierwszostopniowy

Alfa Laval M6M (Cetetherm CT210 GP) 22 płyt, powierzchnia efektywna 2.520m ²								
wsp. k oryginalny	m ₁	m ₂	obliczone współczynniki			wsp. k aproksym.	błąd względny	korelacja
W/m ² K	kg/s	kg/s	c	a ₁	a ₂	W/m ² K	%	
4824	0,860	0,570	6977	0,255583	0,905417	4036	16,3%	0,778
3972	0,669	0,505				3390	14,7%	
3780	1,097	0,495				3780	0,0%	
3141	0,783	0,469				3299	-5,0%	
2852	0,293	0,358				2012	29,4%	
2548	0,479	0,571				3479	-36,6%	
2528	0,685	0,363				2528	0,0%	
2000	0,274	0,363				2000	0,0%	

Ze względu na różne warunki pracy wymienników c.w.u. w węzłach równoległym i “pierwszostopniowym” zdecydowano się na oddzielne wyliczenie współczynników służących do obliczenia współczynników przenikania ciepła k .

7.3.2 Wyniki symulacji

Wyniki symulacji przedstawiono w formie wykresów obrazujących zmianę strumienia wody sieciowej w funkcji temperatury zewnętrznej.

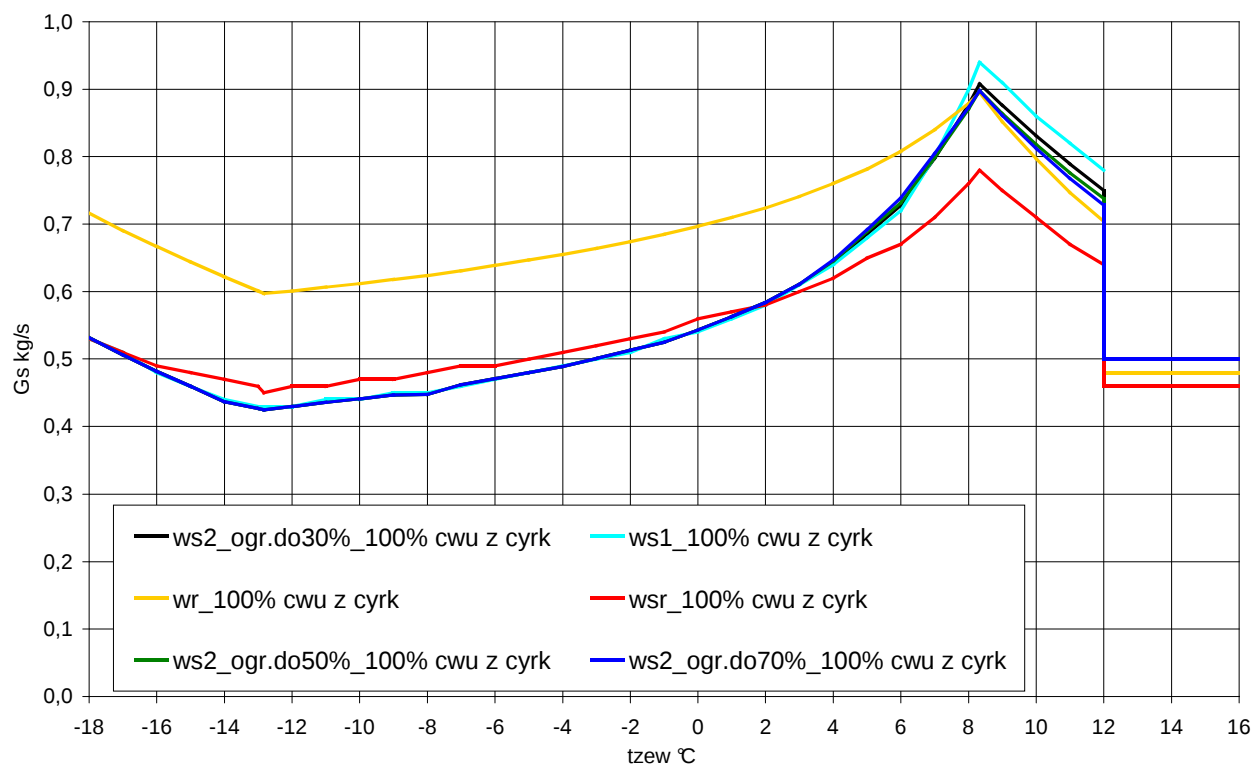
Legenda:

- wsr* – węzeł szeregowo równoległy
- wr* – węzeł równoległy
- ws1* – węzeł pierwszostopniowy w wersji 1
- ws2_ogr.do30%* – węzeł pierwszostopniowy w wersji 2 z maksymalnie 30% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika c.w.u.
- ws2_ogr.do50%* – węzeł pierwszostopniowy w wersji 2 z maksymalnie 50% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika c.w.u.
- ws2_ogr.do70%* – węzeł pierwszostopniowy w wersji 2 z maksymalnie 70% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika c.w.u.

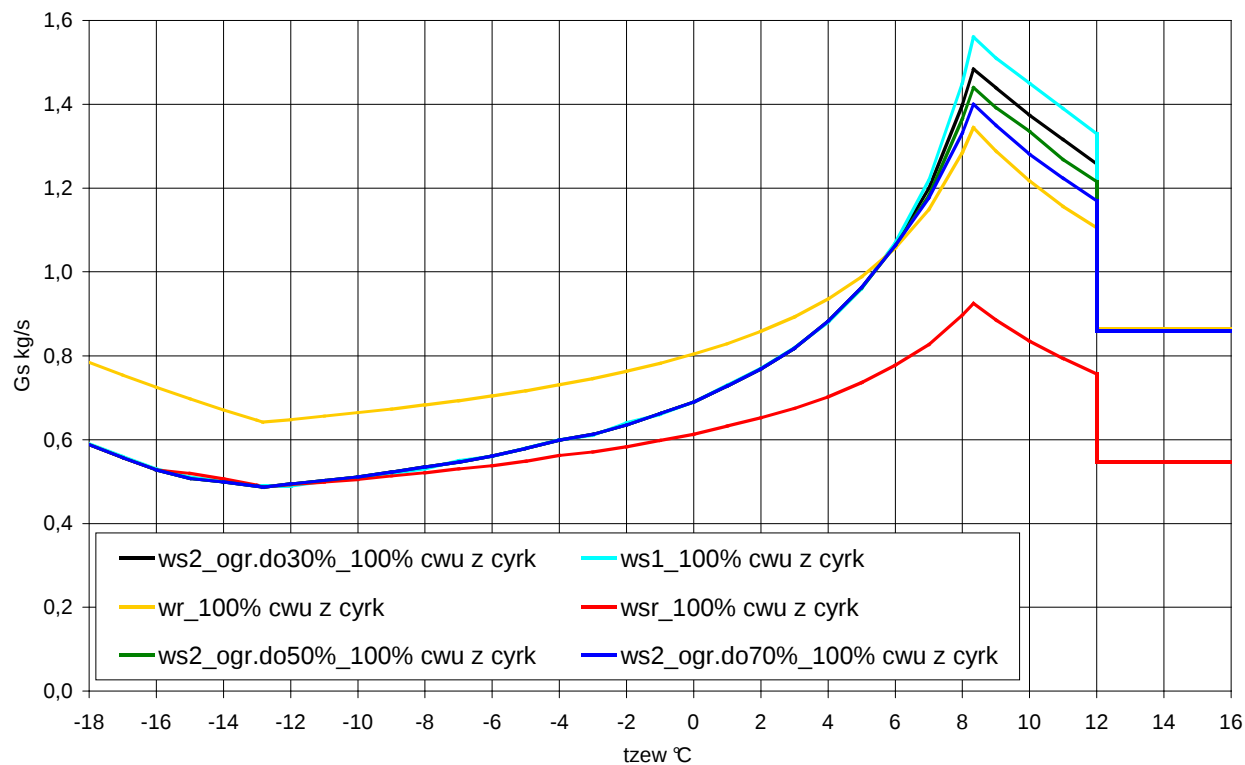
Na rysunkach od 30 do 47 przedstawiono porównanie strumieni wody sieciowej przy zmiennym obciążeniu (poborze) c.w.u. węzłów szeregowo-równoległego i równoległego z węzłem pierwszostopniowym wersjach pierwszej i drugiej. Wersja druga węzła pierwszostopniowego przedstawiona została w trzech wersjach z wymuszonym przepływem wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. przez obejście wymiennika c.w.u. (30%, 50% i 70%).

Ze względu na duże różnice w obliczeniach współczynników przenikania ciepła k (w wersjach z aproksymowanym i liczonym ze wzorów kryterialnych współczynnika k) można zaobserwować duże różnice w uzyskanych dla węzłów z wymiennikami płytowymi przepływach wody sieciowej. Podczas obliczeń różnice pomiędzy współczynnikami przewodzenia ciepła uzyskanymi dwoma różnymi metodami sięgały 40 %. Ze względu na to że dobór powierzchni wymiennika został oparty na programie CAS200 firmy ALFA LAVAL przy mniejszych współczynnikach k uzyskano mniejsze końcowe różnice temperatur, co w końcowym efekcie dało znaczne różnice w przepływach wody sieciowej przedstawionych na wykresach.

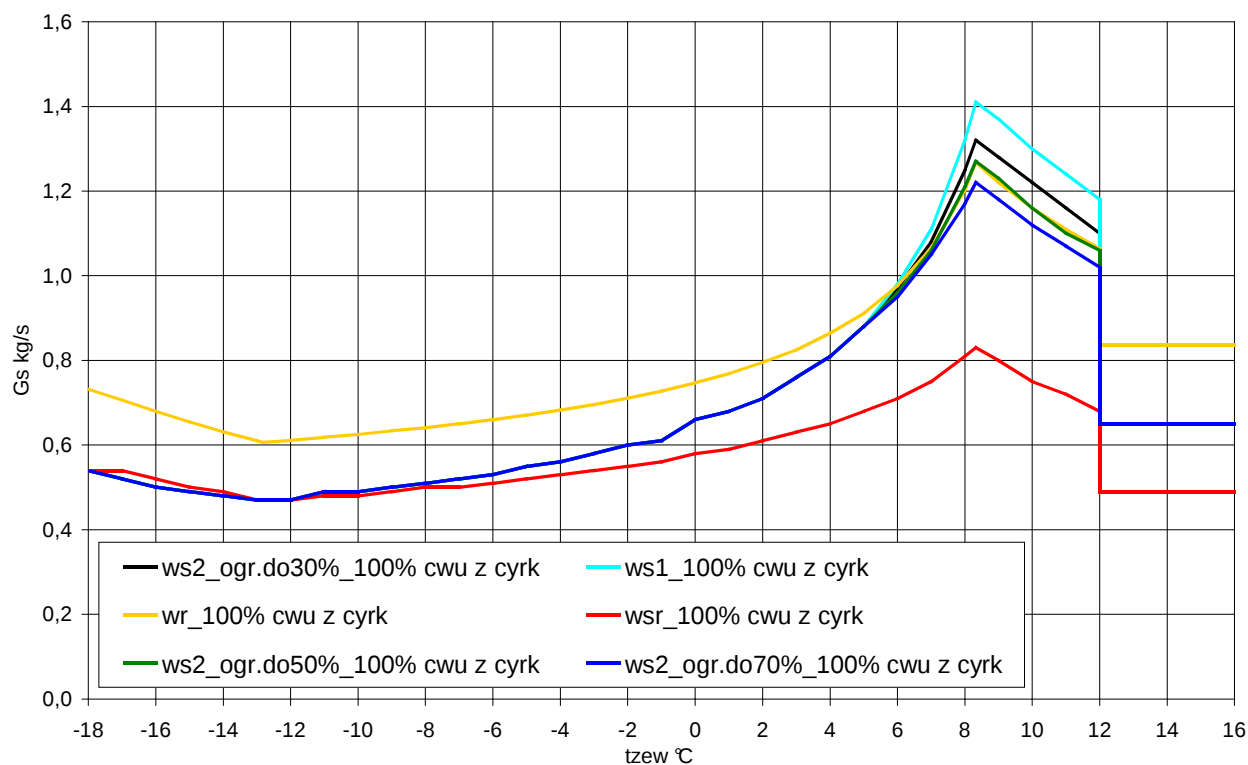
Przy założeniu poprawności działania programu CAS200 oraz przyjętej metodzie aproksymacji współczynnika k , analizując pracę węzłów ciepłowniczych bazujących na wymiennikach płytowych powinniśmy opierać się na wykresach uzyskanych na podstawie metody aproksymacji współczynnika k .



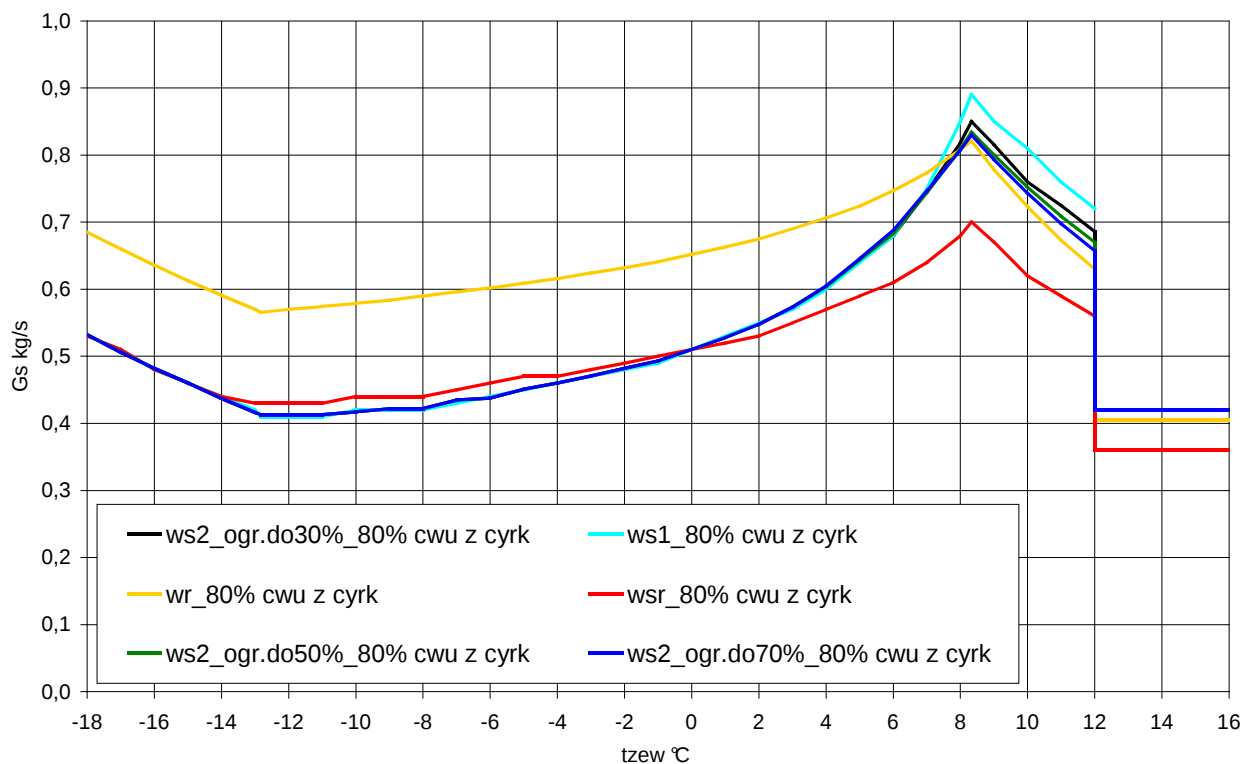
Rysunek 30: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproksymacja współczynnika k) – obciążenie 100% c.w.u.



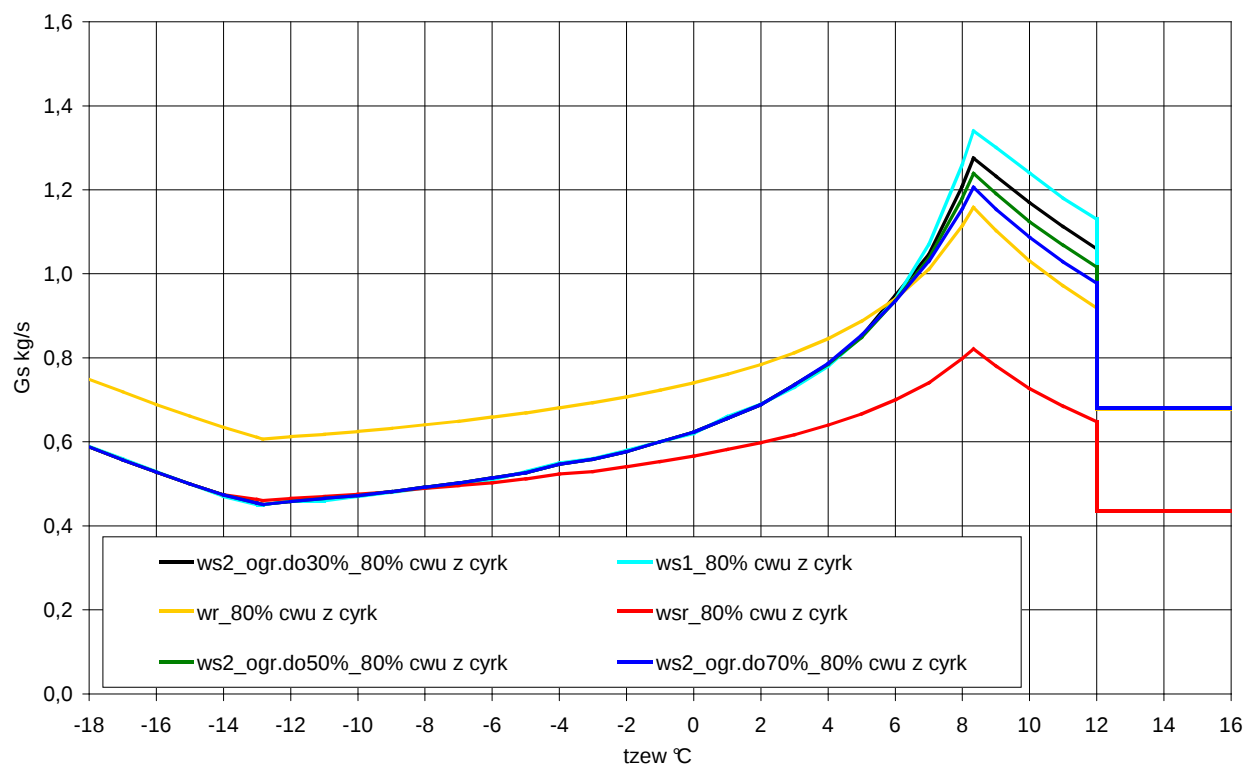
Rysunek 31: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 100% c.w.u.



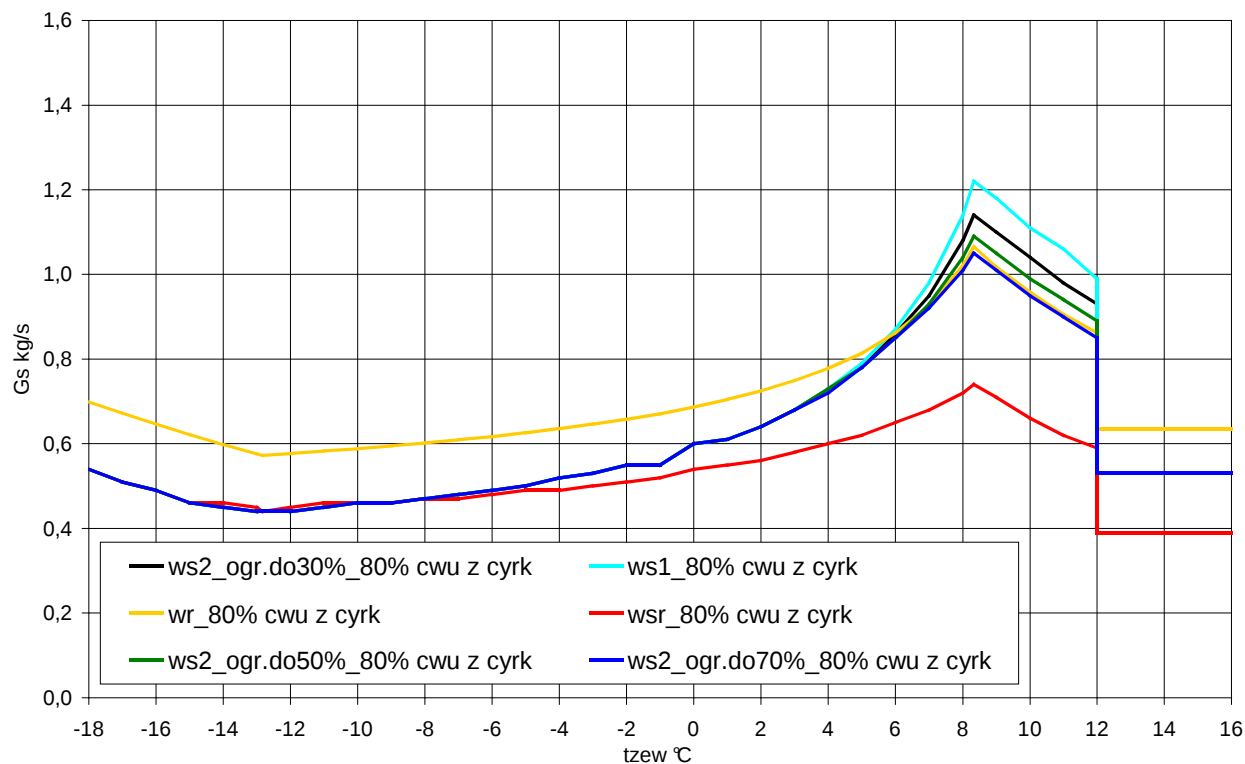
Rysunek 32: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach JAD – obciążenie 100% c.w.u.



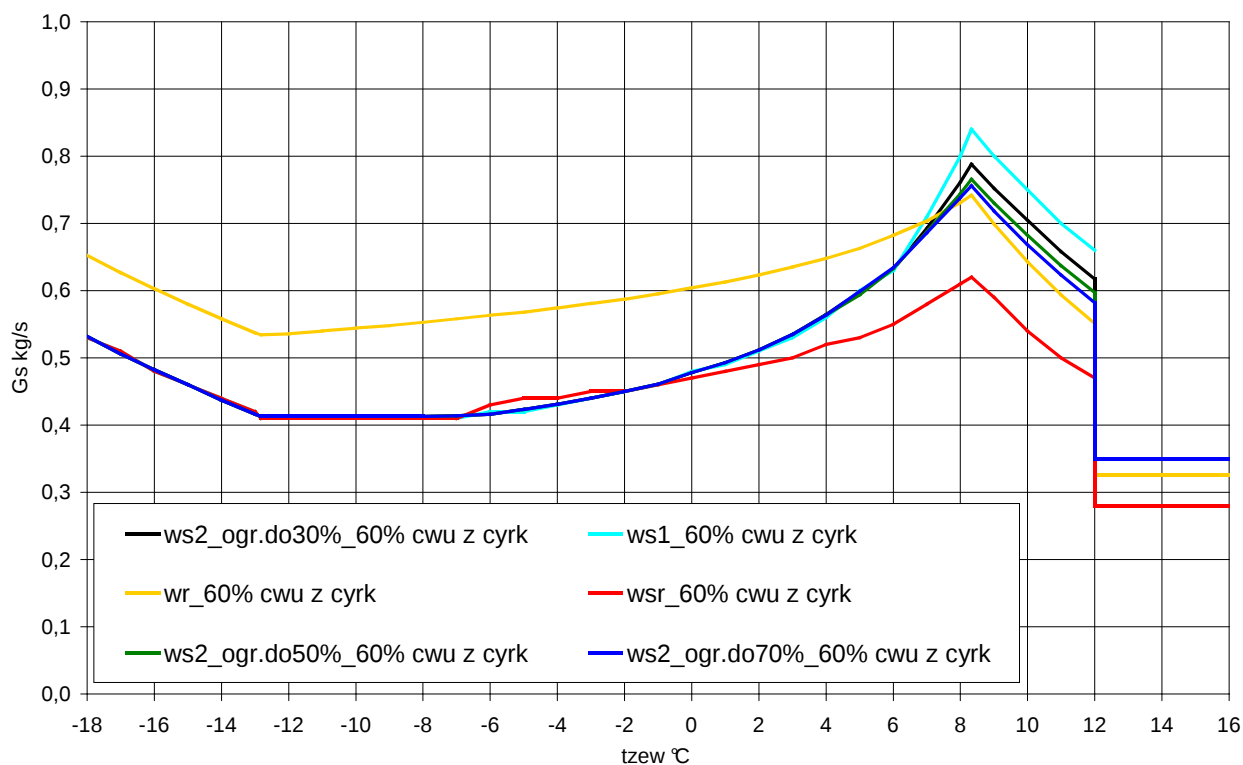
Rysunek 33: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k) – obciążenie 80% c.w.u.



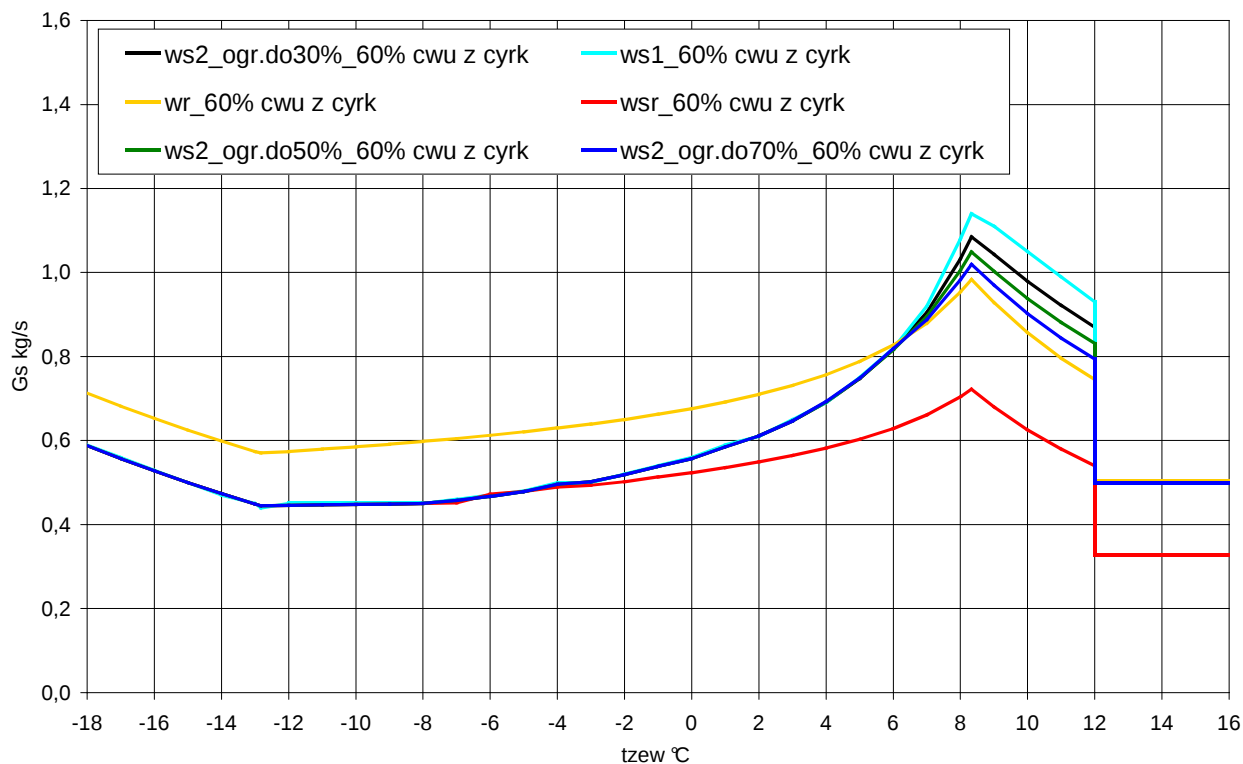
Rysunek 34: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 80% c.w.u.



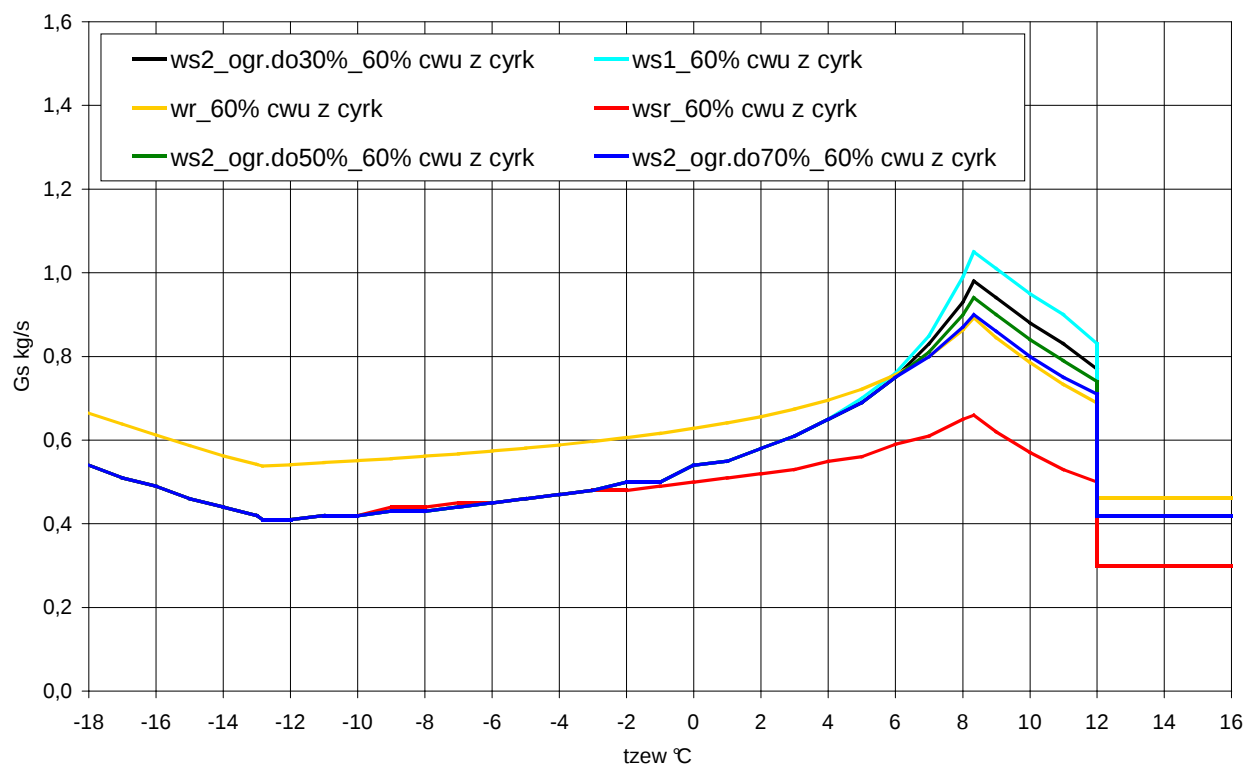
Rysunek 35: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach JAD – obciążenie 80% c.w.u.



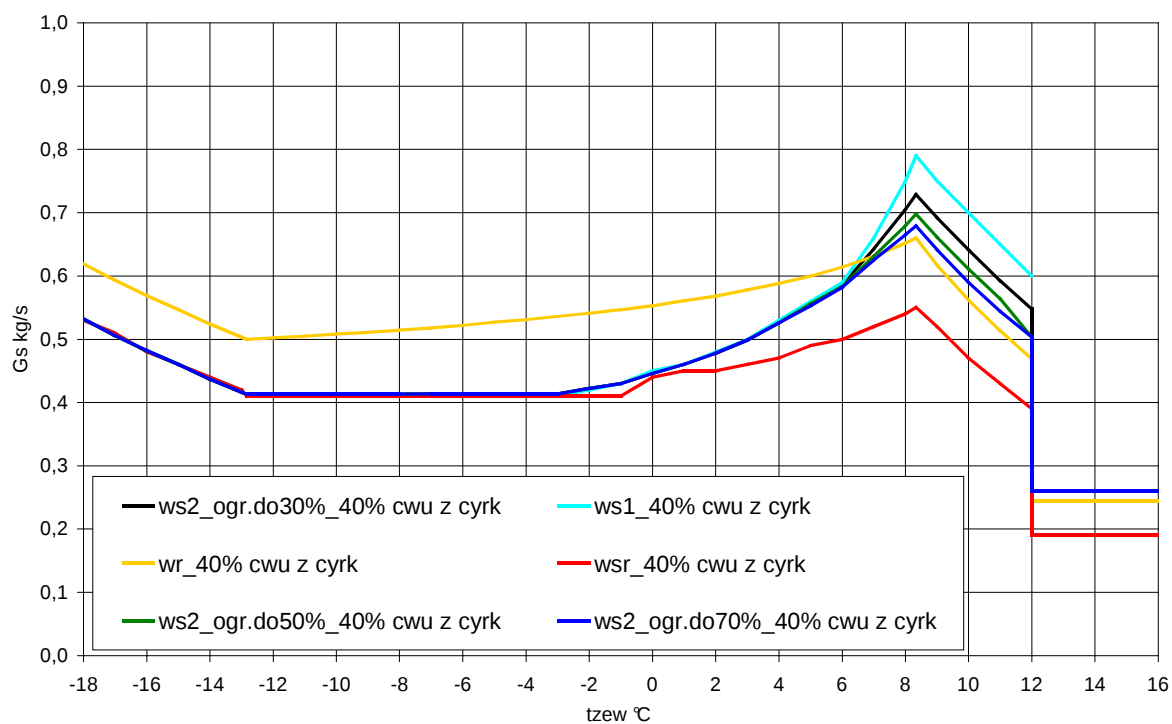
Rysunek 36: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproksymacja współczynnika k) – obciążenie 60% c.w.u.



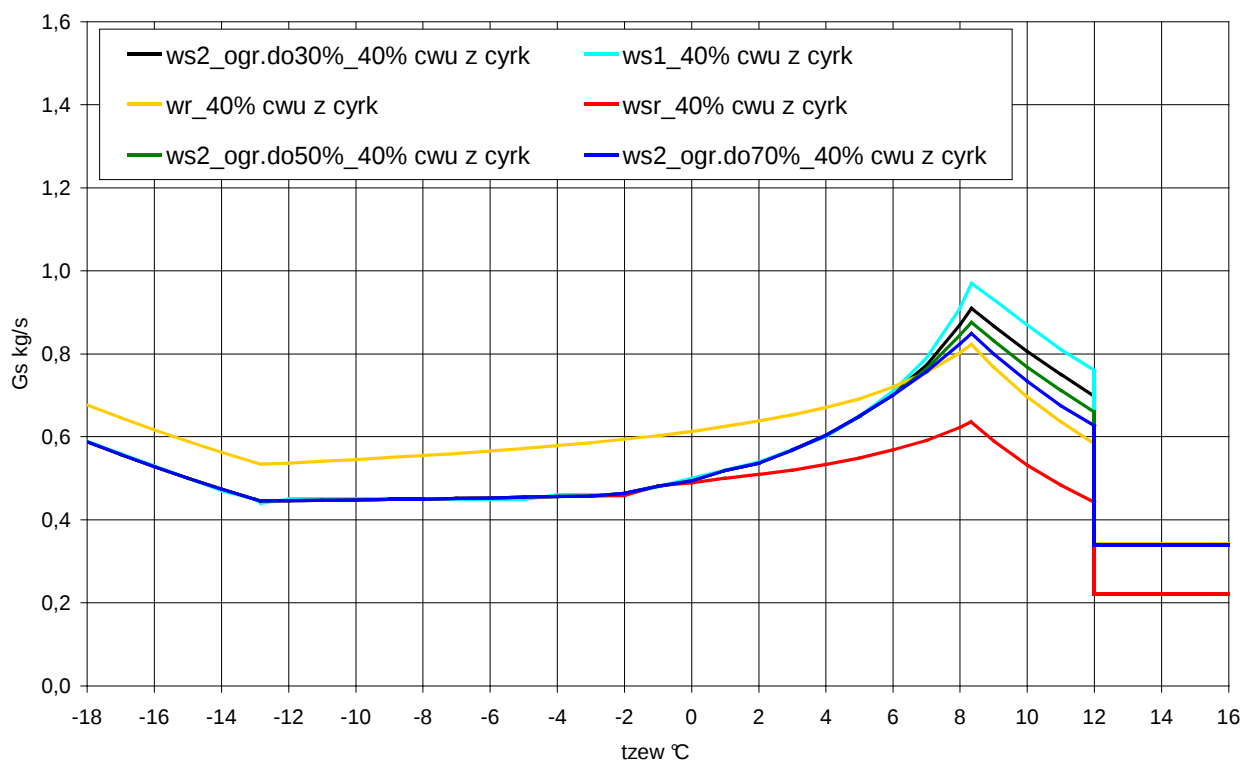
Rysunek 37: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 60% c.w.u.



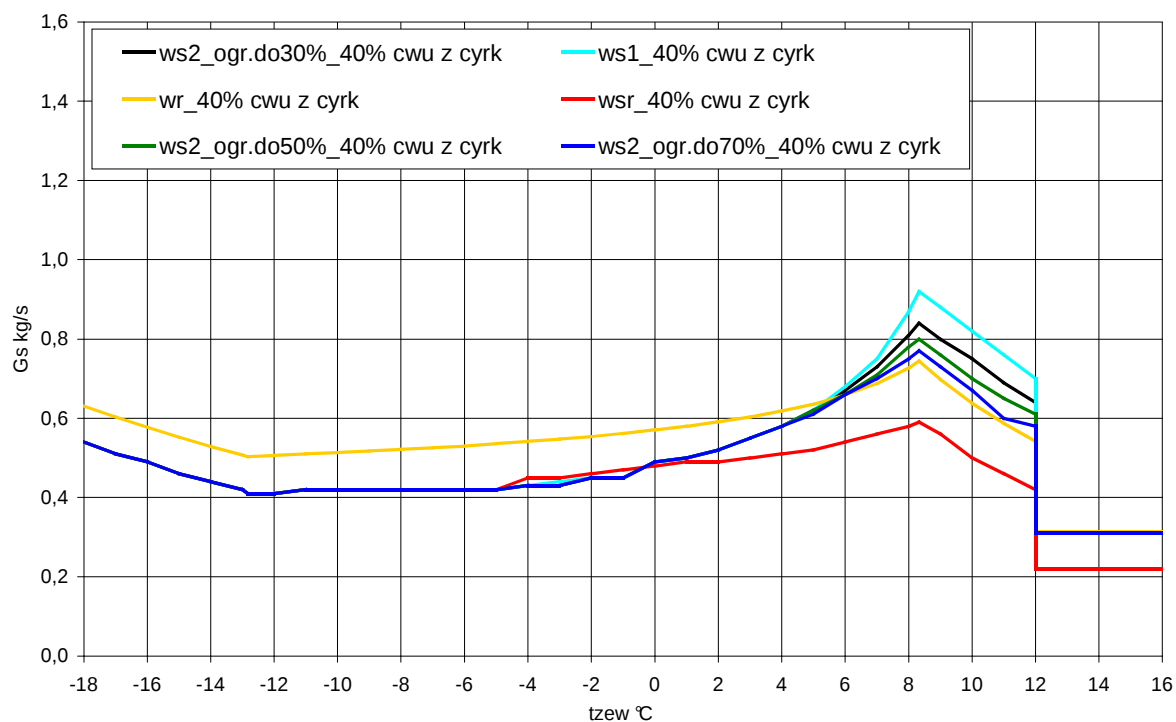
Rysunek 38: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach JAD – obciążenie 60% c.w.u.



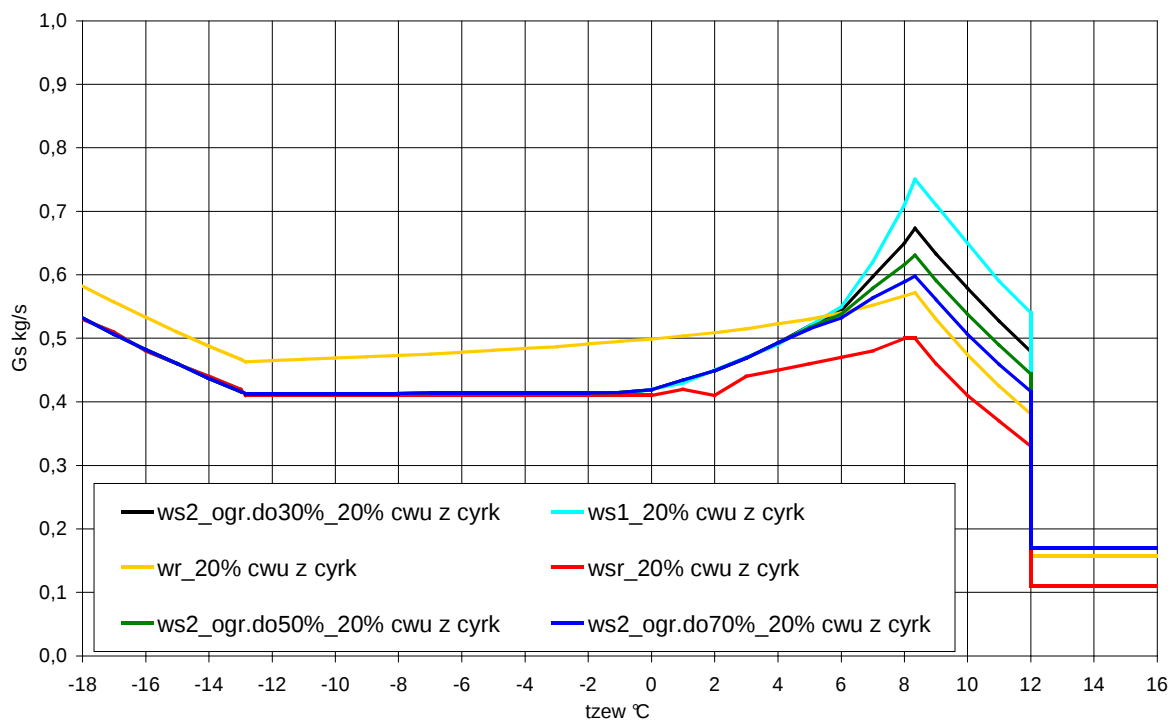
Rysunek 39: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k) – obciążenie 40% c.w.u. – odpowiada średniemu godzinowemu poborowi w węźle badawczym



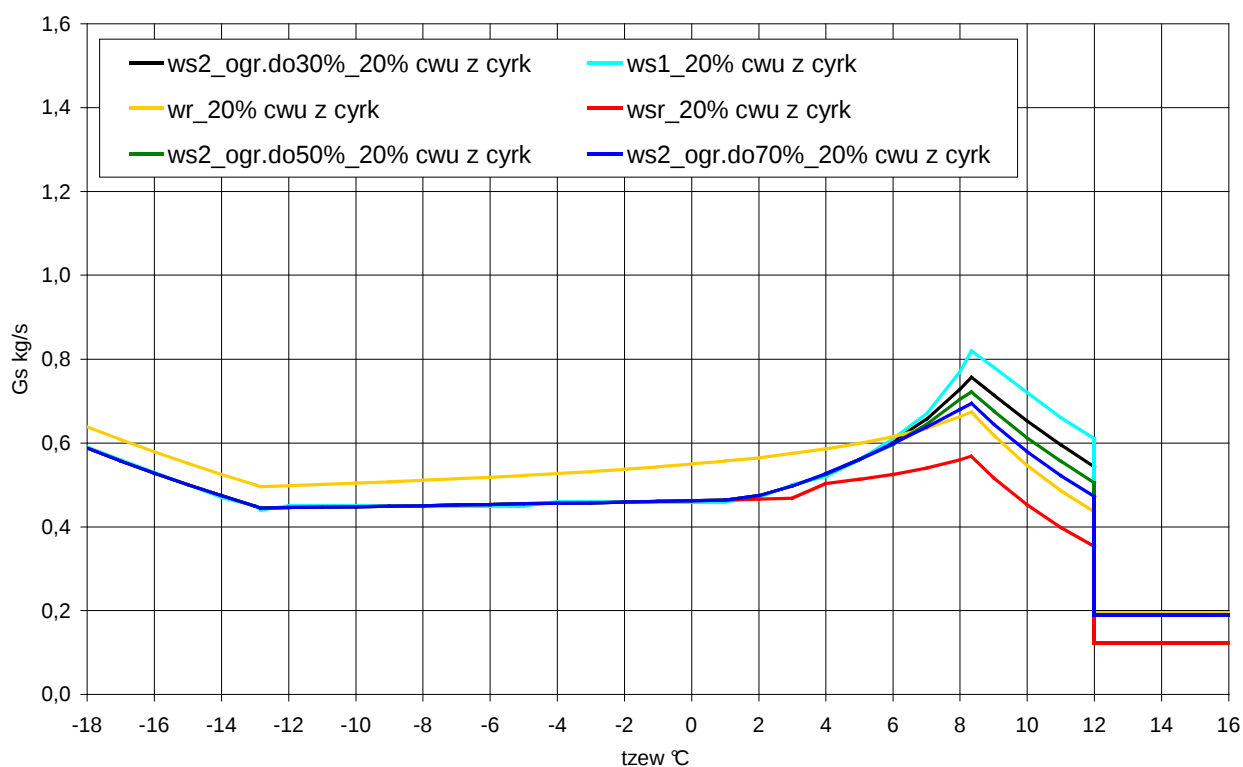
Rysunek 40: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 40% c.w.u. – odpowiada średniemu godzinowemu poborowi w węźle badawczym



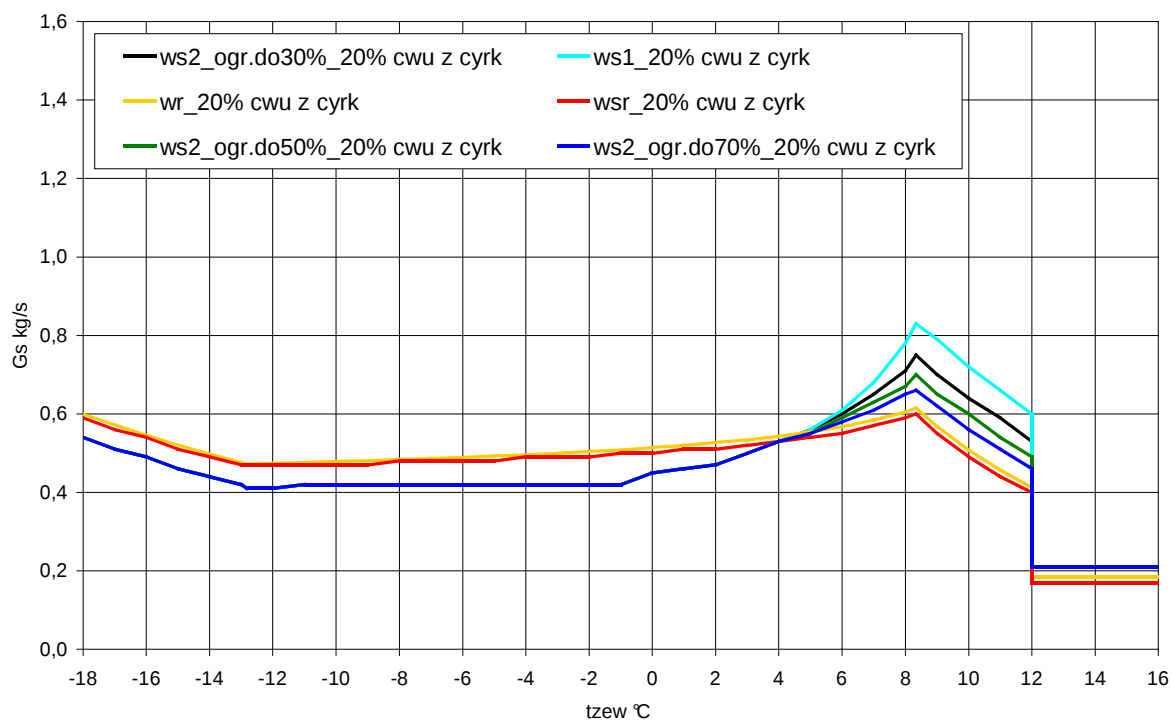
Rysunek 41: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach JAD – obciążenie 40% c.w.u. – odpowiada średniemu godzinowemu poborowi w węźle badawczym



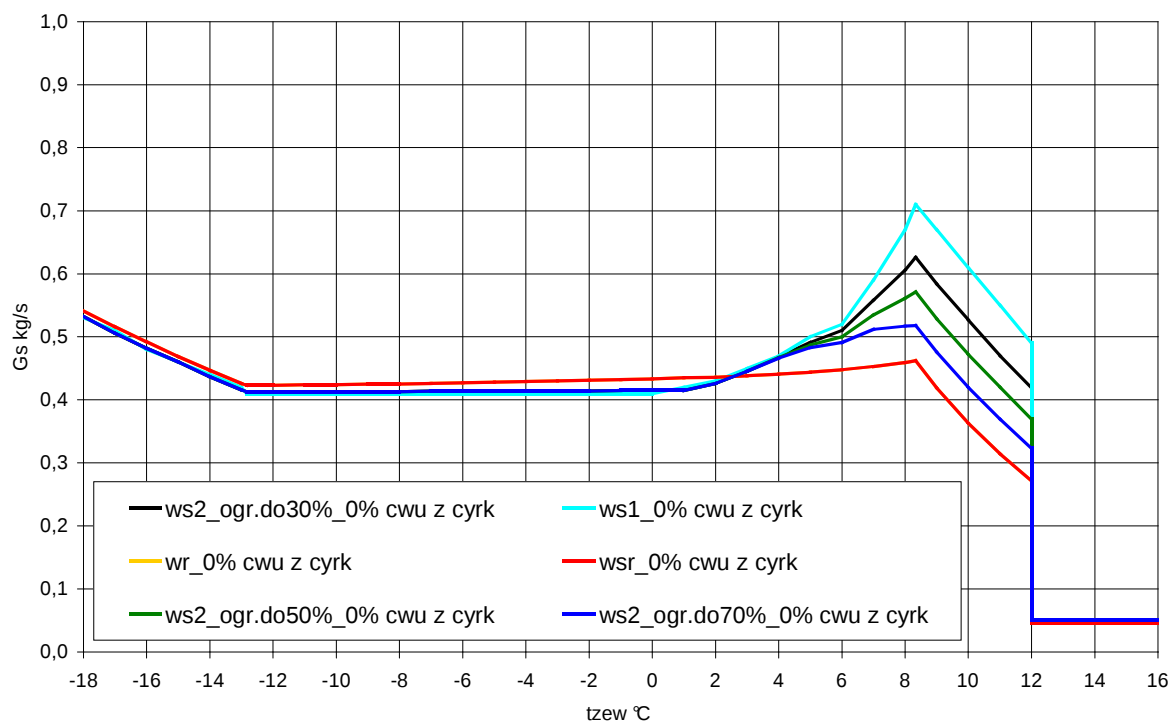
Rysunek 42: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproksymacja współczynnika k) – obciążenie 20% c.w.u.



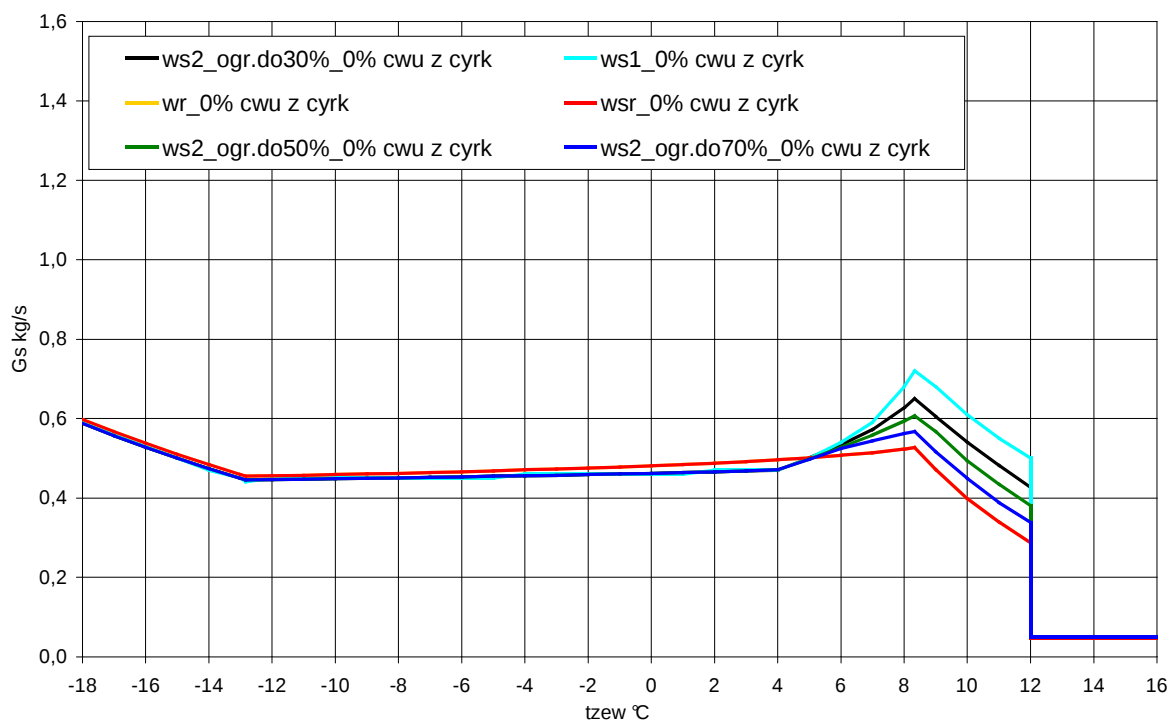
Rysunek 43: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 20% c.w.u.



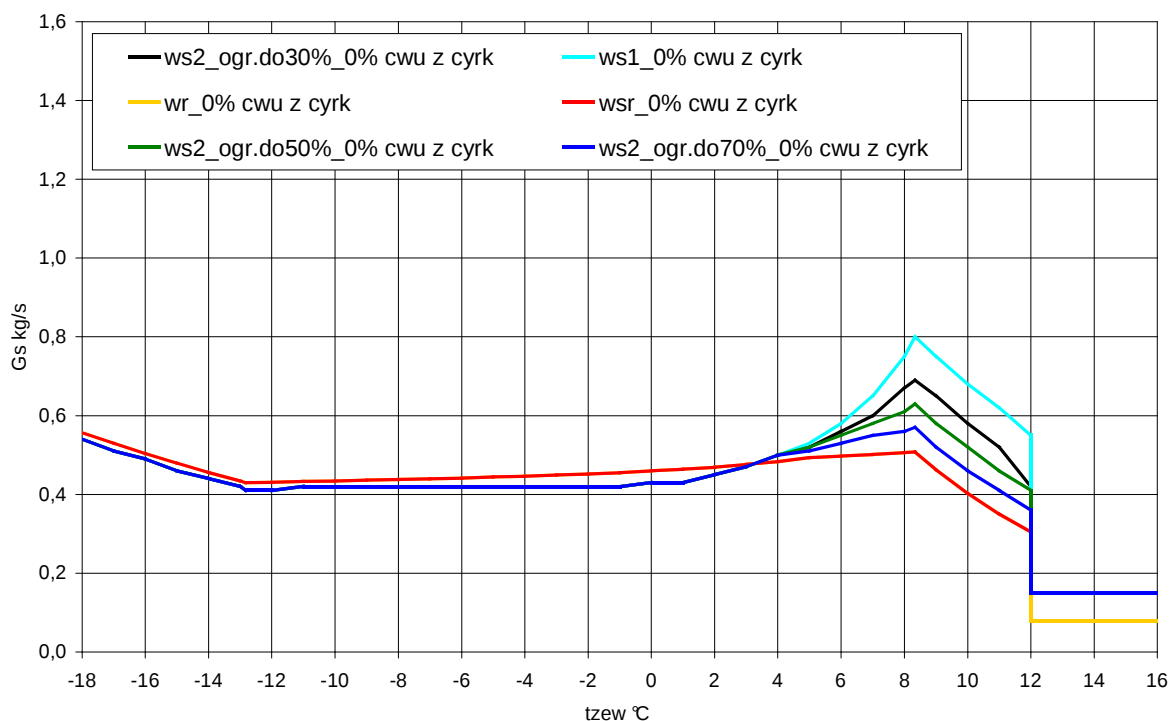
Rysunek 44: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach JAD – obciążenie 20% c.w.u.



Rysunek 45: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproksymacja współczynnika k) – obciążenie 0% c.w.u. (wyłącznie praca układu cyrkulacji)



Rysunek 46: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (współczynnik k bazujący na wzorach kryterialnych) – obciążenie 0% c.w.u. (wyłącznie praca układu cyrkulacji)

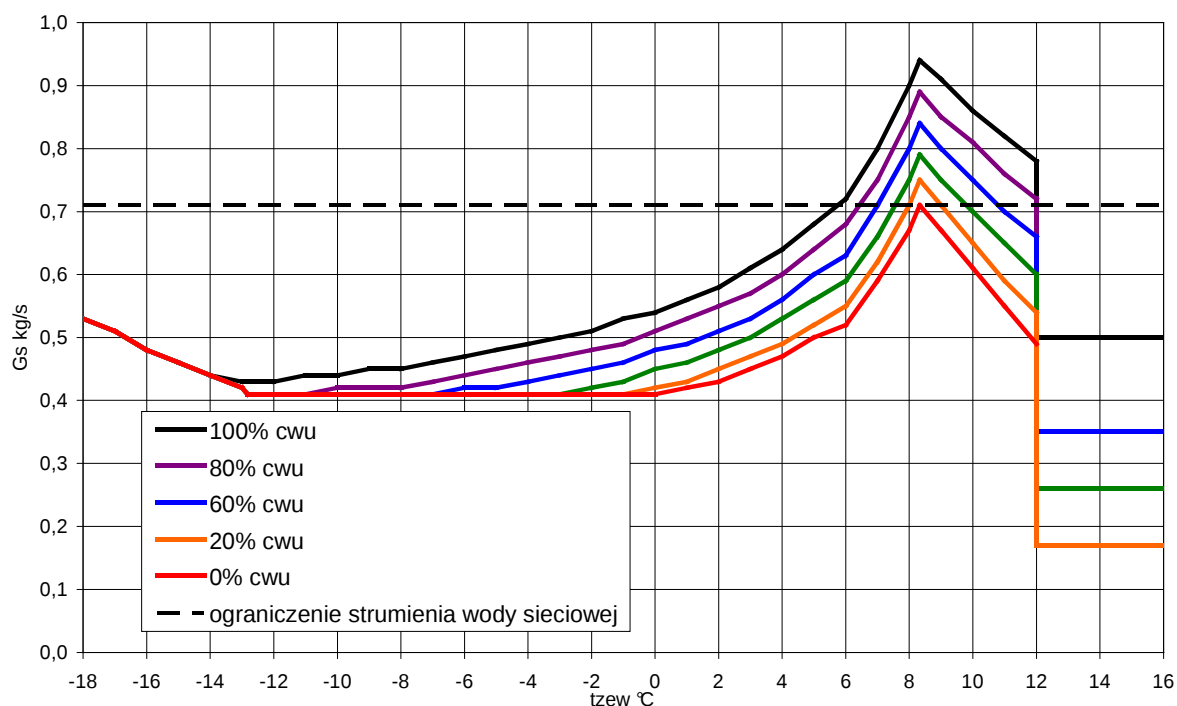


Rysunek 47: Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych JAD – obciążenie 0% c.w.u. (wyłącznie praca układu cyrkulacji)

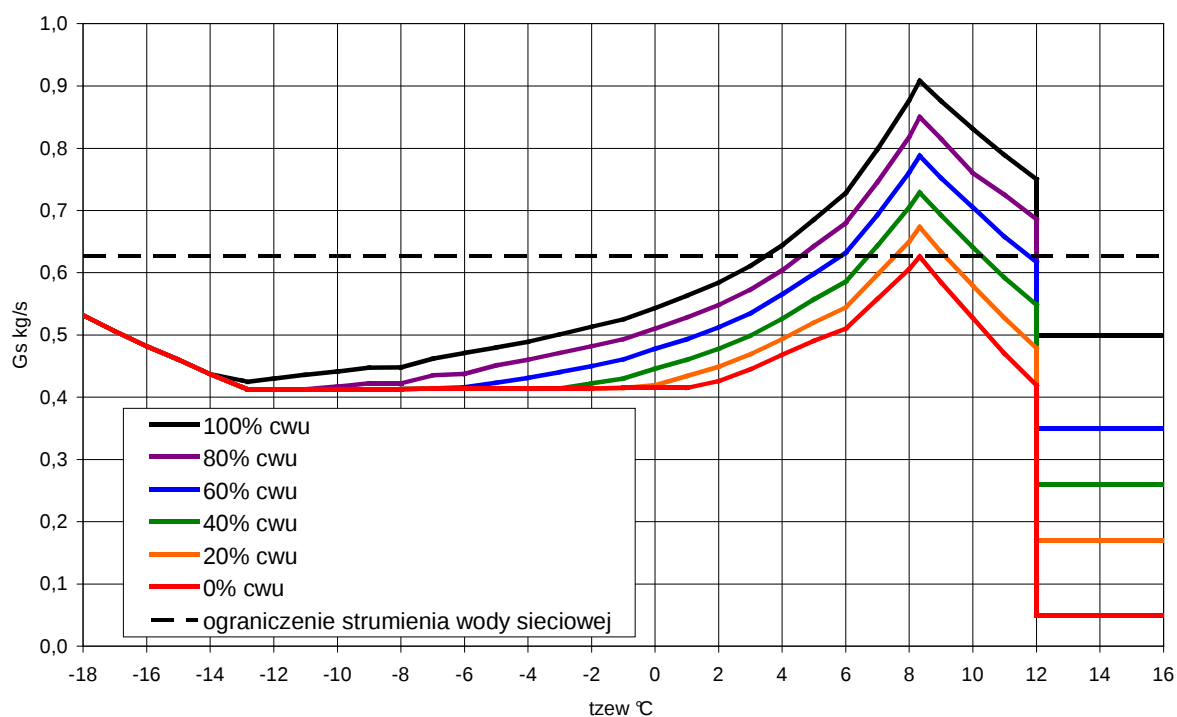
Na podstawie wyników symulacji można zauważyć, że zmniejszenie przepływów c.w.u. nie ma większego wpływu na procentowe różnice przepływów wody sieciowej pomiędzy węzłami o różnej konfiguracji. Najmniejszymi przepływami wody sieciowej charakteryzuje się węzeł szeregowo-równoległy z cyrkulacją włączoną pomiędzy wymiennikami c.w.u. Węzeł pierwszostopniowy przy niskich temperaturach zewnętrznych utrzymuje przepływy wody sieciowej zbliżone do węzła szeregowo-równoległego. W okresie przejściowym i na końcu sezonu grzewczego węzeł pierwszostopniowy wymaga strumienia wody sieciowej większego niż węzeł równoległy o około 10 do 14%. W tym okresie kierując się wyłącznie ograniczeniem strumienia należało by umożliwić zmianę konfiguracji węzła z pierwszostopniowego na równoległy.

Na rysunkach 48 do 51 zestawiono porównanie przepływów wody sieciowej w węźle pierwszostopniowym przy zmiennym poborze c.w.u. oraz zmiennej konfiguracji węzła. W przypadku zastosowania wersji pierwszej najmniejszy obliczeniowy strumień wody sieciowej wymagany do poprawnej pracy węzła wyniósł by 0.71kg/s. Ograniczenie strumienia wody sieciowej przyjęto dla najniższego strumienia wody sieciowej gwarantującego poprawną pracę węzła przy braku poboru c.w.u. (poprawna praca instalacji cyrkulacyjnej). Pobór c.w.u. w okresie przejściowym i na końcu sezonu grzewczego wiązałby się z zastosowaniem priorytetu c.w.u. i ograniczeniem strumienia wody sieciowej na potrzeby c.o. W przypadku węzła pierwszostopniowego w wersji drugiej zmniejszenie przepływu wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. skutkuje możliwością zmniejszenia obliczeniowego strumienia wody sieciowej do poziomu gwarantującego jego prawidłową pracę przy temperaturze zewnętrznej obliczeniowej. Zgodnie z wynikami symulacji przy tak ustalonym strumieniu obliczeniowym przepływ wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. kierowanej na obejście wymiennika c.w.u. wyniósłby około 60%, a wymagany obliczeniowy strumień wody sieciowej zmniejszyłby się od 30 do 40% w porównaniu z węzłem w wersji pierwszej.

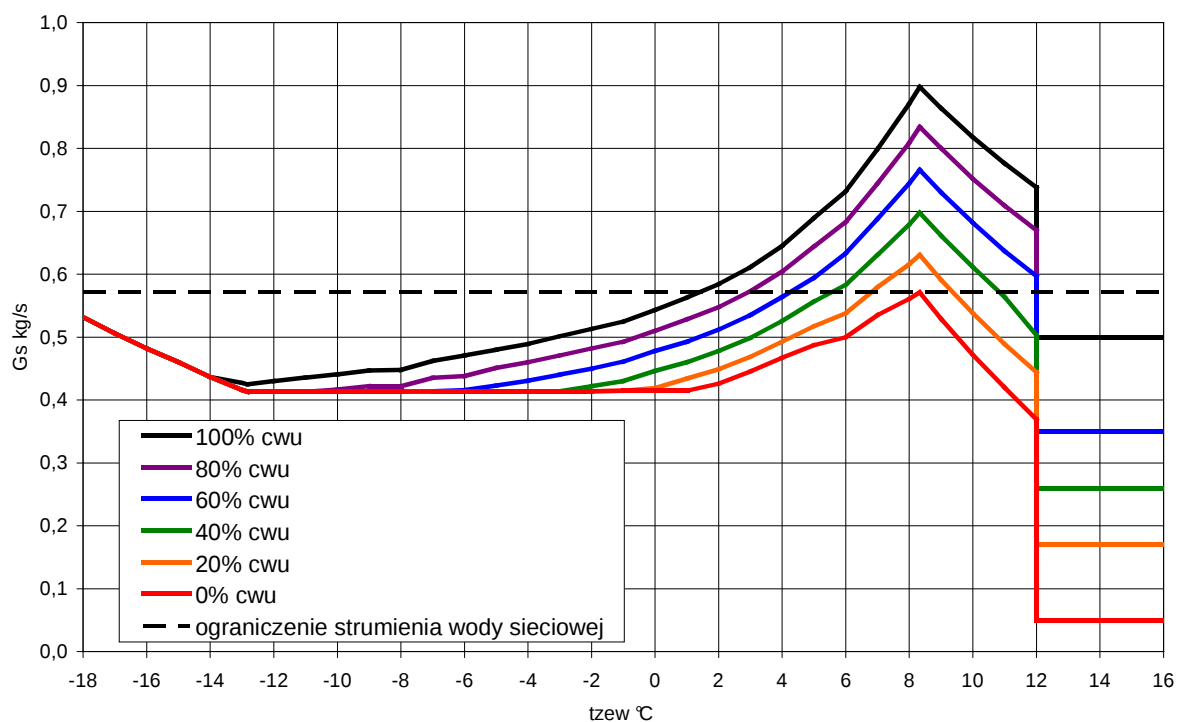
Takie działanie związane jest jednak ze znacznym zwiększeniem wysokości (głębokości) priorytetu c.w.u. i tego typu węzeł nie będzie mógł pracować w obiektach o lekkiej konstrukcji i z długim czasem rozbioru c.w.u.



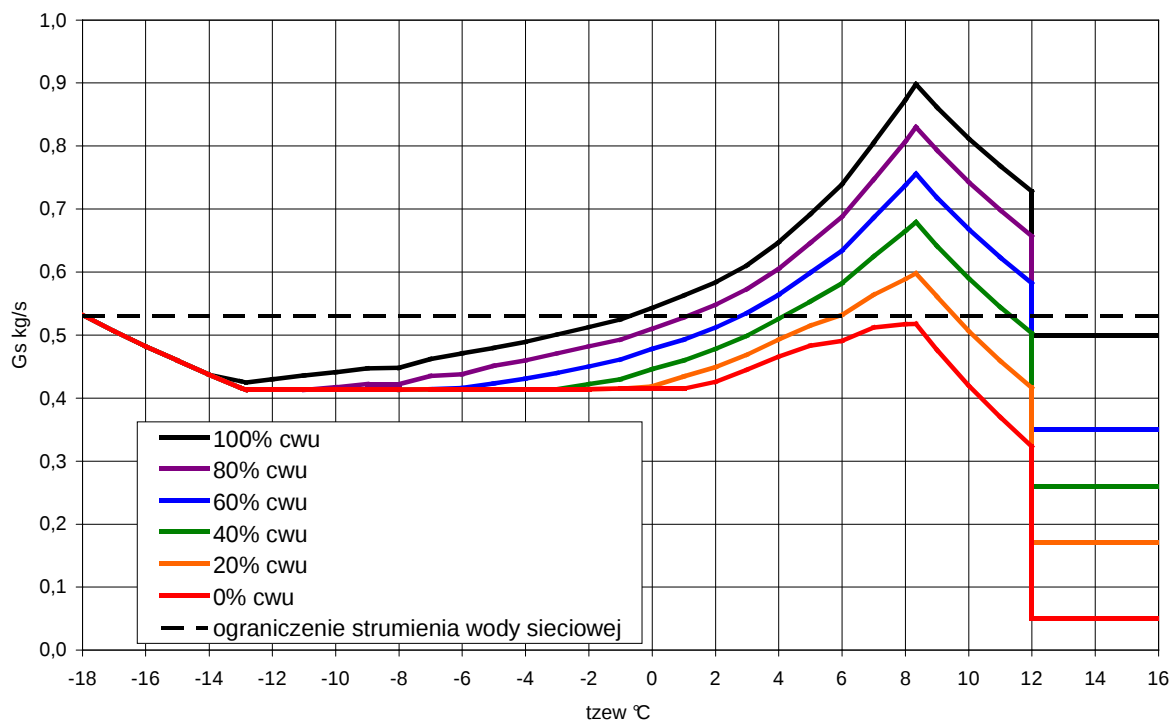
Rysunek 48: Zmienność strumienia wody sieciowej węzła pierwszostopniowego w wersji 1
Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k)



Rysunek 49: Zmienność strumienia wody sieciowej węzła pierwszostopniowego w wersji 2
z maksymalnie 30% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika
c.w.u. Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k)

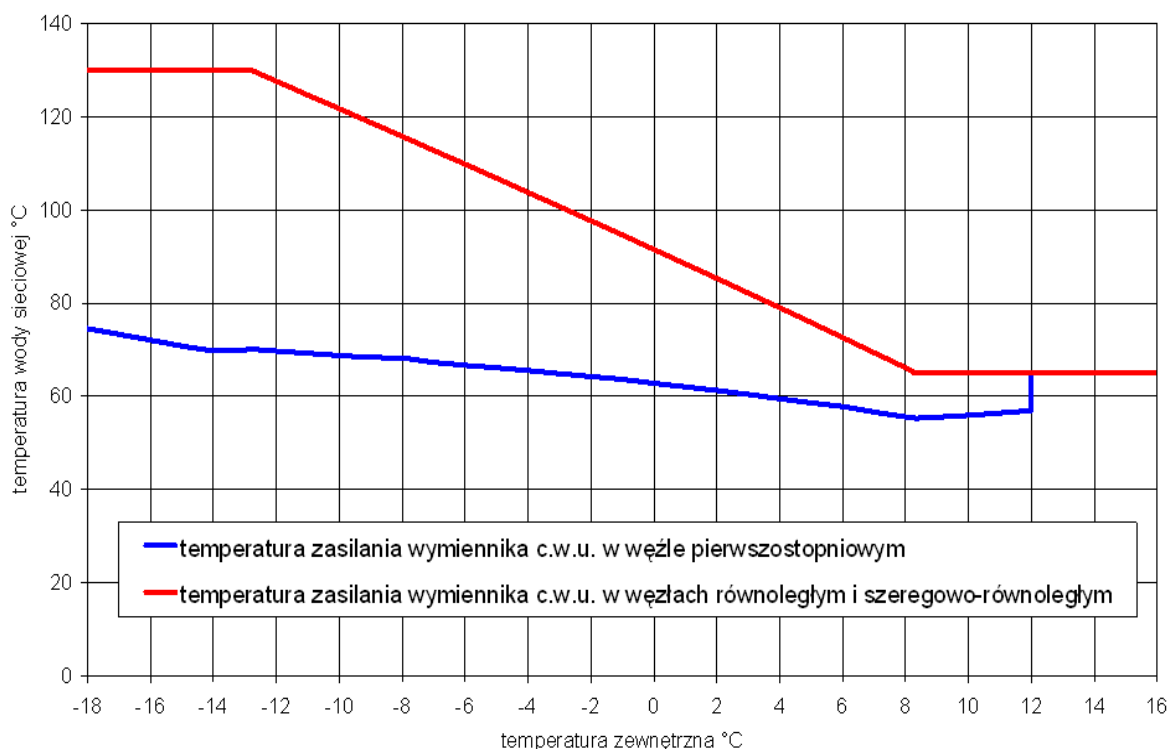


Rysunek 50: Zmienność strumienia wody sieciowej węzła pierwszostopniowego w wersji 2 z maksymalnie 50% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika c.w.u. Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k)



Rysunek 51: Zmienność strumienia wody sieciowej węzła pierwszostopniowego w wersji 2 z maksymalnie 70% przepływem wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez obejście wymiennika c.w.u. Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k)

Na rysunku 52 przedstawiono porównanie temperatur zasilania wymiennika c.w.u. w funkcji temperatury zewnętrznej dla węzłów pierwszostopniowego oraz szeregowo-równoległego.



Rysunek 52: Porównanie temperatur zasilania wymiennika c.w.u. w funkcji temperatury zewnętrznej. Symulacja węzłów bazujących na wymiennikach płytowych (aproxymacja współczynnika k)

Przy zastosowaniu węzłów pierwszostopniowych (dla analizowanego obiektu) możliwe jest obniżenie temperatury zasilania wymiennika c.w.u. maksymalnie do wartości 75°C (o 55°C!) w porównaniu do pozostałych węzłów ciepłowniczych.

8. Badania na obiekcie rzeczywistym

Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja poprawności uzyskanych w symulacjach wyników jak i opracowanie algorytmu sterowania węzła pierwszostopniowego. Dzięki uprzejmości MPEC Wrocław badania przeprowadzono w jednym z węzłów ciepłowniczych dla budynku mieszkalnego na terenie Wrocławia.

8.1 Opis stanowiska badawczego

Budynek przy ul. Glinianej jest budynkiem pięciokondygnacyjnym, podpiwniczonym, składającym się z 6 klatek, posiadającym 10 mieszkań na klatkę schodową. Budynek wykonany jest w technologii wielkiej płyty ocieplony 8cm warstwą styropianu. Budynek zasilany jest przez dwa

węzły ciepłownicze: Gliniana 75 i Gliniana 81. Ze względu na duże podobieństwo „fizyczne” odbiorów (węzłów) jednym z założeń badań miało być porównanie pracy węzłów kompaktowego szeregowo-równoległego (Gliniana 81) i badawczego (Gliniana 75).

Zapotrzebowanie na ciepło każdego z wyżej wymienionych węzłów ciepłowniczych wg danych MPEC Wrocław wynosi $Q_{obl}^{co} = 124 \text{ kW}$, $Q_{c.w.u.}^{sr} = 31 \text{ kW}$

Na podstawie danych uzyskanych na etapie projektowania węzła z MPEC Wrocław oszacowano $Q_{c.w.u.}^{maxh}$, Q_{max}^h (przy założonej liczbie mieszkańców $n=90$ osób oraz temperaturach obliczeniowych wody zimnej 10°C , c.w.u. 55°C) na poziomie 95 kW . Usytuowanie budynku na planie miasta przedstawiono na rysunku 53.



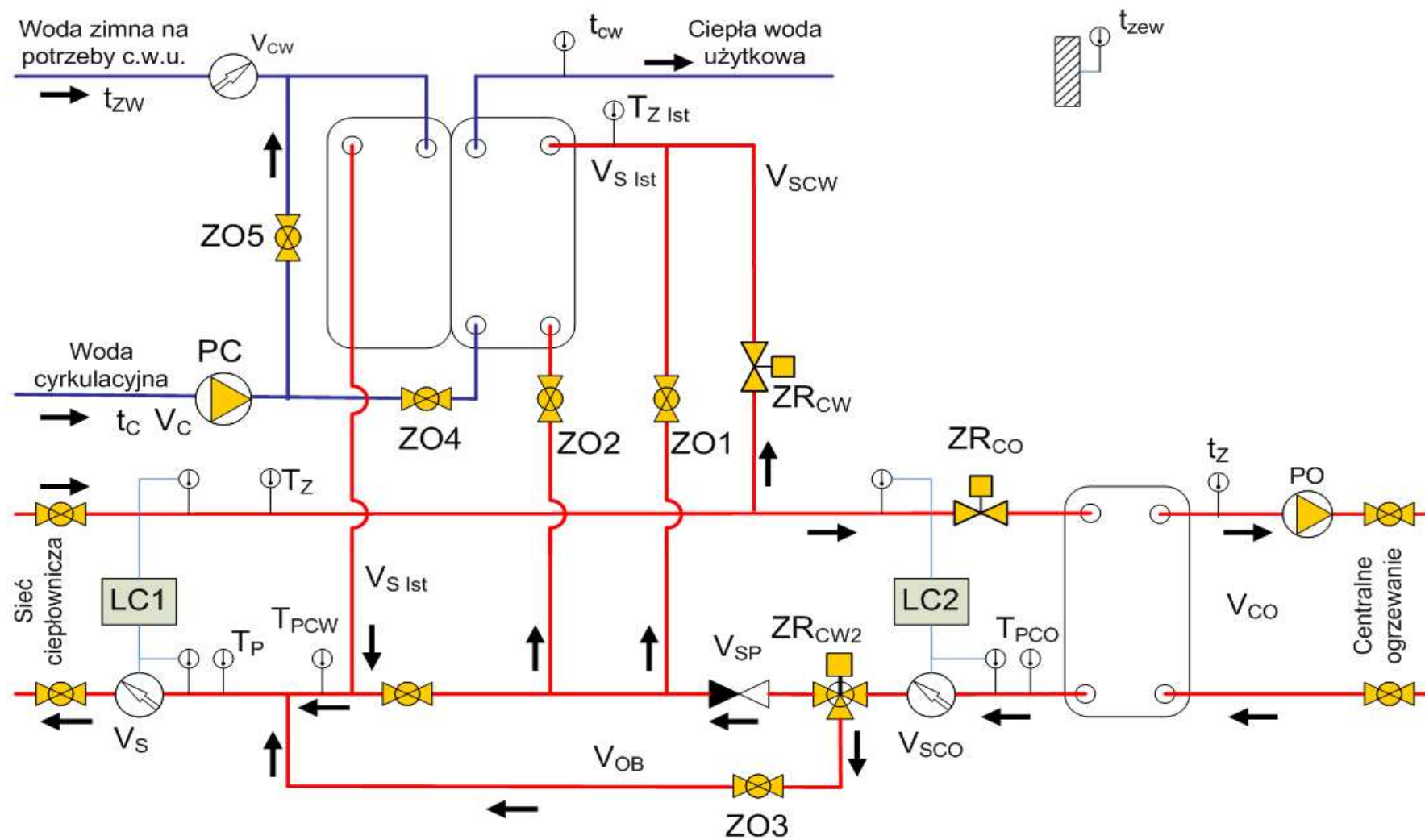
Rysunek 53: Usytuowanie budynku przy ulicy Glinianej na planie sytuacyjnym

Węzeł ciepłowniczy Gliniana 75 był przed modernizacją węzłem hydroelewatorowym, z dwustopniowym wymiennikowym (2x2WWB) układem przygotowania ciepłej wody użytkowej sterowanym regulatorem bezpośredniego działania typu Mertik. Węzeł wyposażony był również

w stabilizator temperatury c.w.u. Węzeł Gliniana 81 po modernizacji jest węzłem kompaktowym, szeregowo-równoległym bazującym na wymiennikach płytowych. Węzeł Gliniana 75 został poddany modernizacji w sposób umożliwiający zmianę struktury węzła na szeregowo-równoległy, równoległy i „pierwszostopniowy” w wersjach 1 oraz 2 (projekt techniczny [42]). Schemat ideowy węzła badawczego Gliniana 75 znajduje się na rysunku 54.

Węzeł pracuje jako szeregowo-równoległy przy otwartych zaworach odcinających Z02, Z04 oraz zamkniętych Z01, Z03, Z05. W funkcji węzła pierwszostopniowego pracuje przy otwartych zaworach Z01, Z03, Z05 oraz zamkniętych Z02, Z04. Układ węzła pierwszostopniowego w wersji pierwszej uzyskujemy przy położeniu zaworu trójdrogowego ZRCW2 kierującego cały przepływ wody sieciowej powracającej z c.o. na wymiennik c.w.u. Układ węzła pierwszostopniowego w wersji drugiej uzyskujemy poprzez upuszczanie części wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. poza wymiennik c.w.u. zaworem trójdrogowym ZRCW2. Przy całkowitym otwarciu zaworu trójdrogowego ZRCW2 (cały strumień wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. kierowany poza wymiennik c.w.u.) uzyskujemy węzeł szeregowo - równoległy. Ze względu na koszty nie można było zastosować oddzielnie dobranych dla każdej konfiguracji wymienników c.w.u. Zdecydowano się zatem na dobranie wymiennika c.w.u. na parametry obliczeniowe okresu letniego przy obniżonym o 5K temperaturze zasilania wody sieciowej (zamiast 65°C przyjęto 60°C). Zgodnie z „Wytycznymi MPEC Wrocław” [8] węzeł został wyposażony w regulator (ogranicznik) przepływu (nie zamieszczony na schemacie) wody sieciowej. Nastawa regulatora ustalana była na podstawie mocy zamówionej określonej przez wspólnotę mieszkaniową zarządzającą budynkiem. Węzeł ciepłowniczy został wyposażony w dwa zawory regulacyjne przelotowe (ZR_{CO} , ZR_{CW}) oraz jeden zawór regulacyjny trójdrogowy (ZR_{CW2}). Do celów pomiarowych węzeł wyposażono w dwa ultradźwiękowe liczniki ciepła (LC1 i LC2) firmy Kamstrup (Multical 66c z przetwornikiem przepływu Ultraflow 65s), wodomierz JS10-NK z nadajnikiem impulsów do pomiarów zużycia ciepłej wody użytkowej, 7 czujników temperatur zanurzeniowych EGWS 70 oraz czujnik pomiaru temperatury zewnętrznej EGU firmy Tour Andersson Company (TAC). Podczas badań wodomierz JS10-NK firmy Powogaz zastąpiono przepływomierzem elektromagnetycznym (indukcyjnym) Promag 50W DN25 firmy Endress+Hauser. Węzeł sterowany był za pomocą sterownika swobodnie programowalnego Xenta 302 firmy TAC.

Standardowy algorytm sterowania węzłem ciepłowniczym został rozszerzony przez Autora o dodatkowe możliwości sterowania węzła przy różnych jego konfiguracjach. Program do sterownika został napisany przy użyciu oprogramowania TAC Menta.



Rysunek 54: Schemat ideowy węzła Gliniana 75

Na rysunku 55 przedstawiono zdjęcie węzła Gliniana 75 po jego modernizacji.



Rysunek 55: Węzeł doświadczalny Gliniana 75

Badania pracy węzła przy ulicy Glinianej 75 prowadzone były od stycznia 2004 do grudnia 2005 roku. Zbieranie danych z węzła Gliniana 75 do września 2004 odbywało się w sposób ciągły z krokiem 1 godziny. Pobierane były następujące dane:

- temperatura zewnętrzna (t_{zew}),
- temperatura zewnętrzna tłumiona,
- energia na potrzeby węzła ciepłowniczego (odczyt z licznika ciepła LC1),
- energia na potrzeby c.o. (odczyt z licznika ciepła LC2),
- strumień objętości c.w.u. (V_{cw}),
- zużycie ciepłej wody użytkowej,
- strumień objętości wody sieciowej przez węzeł V_s (odczyt z licznika ciepła LC1),
- strumień objętości wody sieciowej przez wymiennik c.o. V_{sco} (odczyt z licznika ciepła LC2),
- temperatura c.w.u. (t_{cw}),

- temperatura zasilania wody sieciowej z sieci ciepłowniczej (T_Z),
- temperatura powrotu wody sieciowej z węzła do sieci ciepłowniczej (T_P),
- temperatura powrotu wody sieciowej z wymiennika c.o. (T_{PCO}),
- temperatura wody sieciowej zasilającej wymiennik c.w.u. (T_{ZIST}),
- temperatura wody sieciowej powracającej z wymiennika c.w.u. (T_{PCWU}),
- temperatura zasilania instalacji centralnego ogrzewania (t_Z).

We wrześniu 2004 na obiekcie został zamontowany komputer z zainstalowanym systemem TAC VISTA który umożliwiał odczyt i magazynowanie danych ze sterownika Xenta (rysunek 56). Zainstalowanie komputera umożliwiło zwiększenie częstotliwości odczytu danych (przyjęto zapis danych co 1 minutę) oraz uzyskiwanie ciągłych wykresów pracy węzła ciepłowniczego (tworzonych w czasie rzeczywistym).

W celu zwiększenia dokładności pomiarów ciepłej wody użytkowej w okresie sierpień-wrzesień 2004, układ pomiarowy węzła Gliniana 75 został rozszerzony o przepływomierz elektromagnetyczny (indukcyjny) Promag 50W firmy Endress+Hauser który umożliwił monitorowanie przepływu c.w.u. w sposób ciągły (przepływomierz wyposażony w wyjście analogowe). W ostatecznej wersji, poza wymienionymi już wcześniej pobierane były dodatkowo wyliczane metodą pośrednią (z bilansu strumieni i temperatur) strumienie objętościowe wody sieciowej przez obejście wymiennika I-go stopnia c.w.u. (V_{OB}), przez I-szy stopień c.w.u. (V_{SIST}), oraz strumień wody sieciowej z wymiennika c.o. płynący przez wymiennik I-st (V_{SP}).

W węźle przy ul. Glinianej 81 zdecydowano się wyłącznie na okresowe (ręczne) odczyty następujących parametrów:

- z licznika ciepła (energia cieplna pobrana przez węzeł w danym okresie; chwilowy strumień objętościowy wody sieciowej, temperatury wody sieciowej na zasilaniu i powrocie węzła, oraz różnica temperatur wody sieciowej w momencie odczytu),
- z wodomierza wody zimnej (ilość wody zimnej pobranej przez klientów na potrzeby c.w.u. w danym okresie).

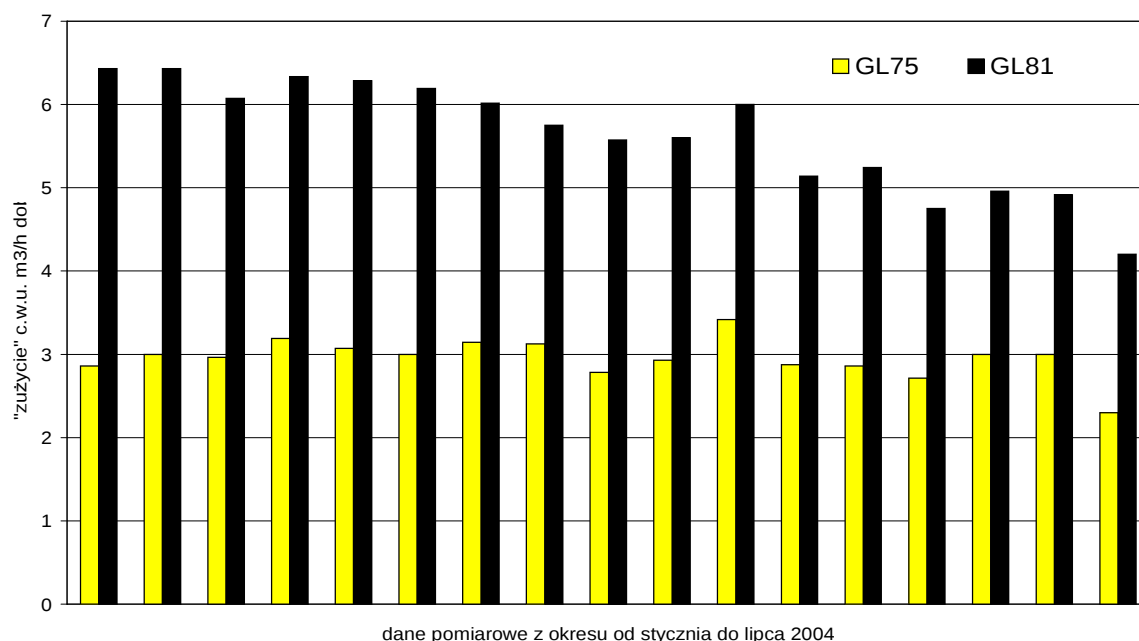
W pierwszym okresie badań (od stycznia do września 2004) celem przeprowadzonych pomiarów było zebranie materiału porównawczego do dalszej analizy pracy węzłów Gliniana 75 oraz Gliniana 81 przy standardowej konfiguracji węzła szeregowo-równoległego.



Rysunek 56: Komputer do zbierania danych oraz szafa sterownicza na węźle Gliniana 75

8.1.1 Porównanie pracy węzłów Gliniana 75 i Gliniana 81

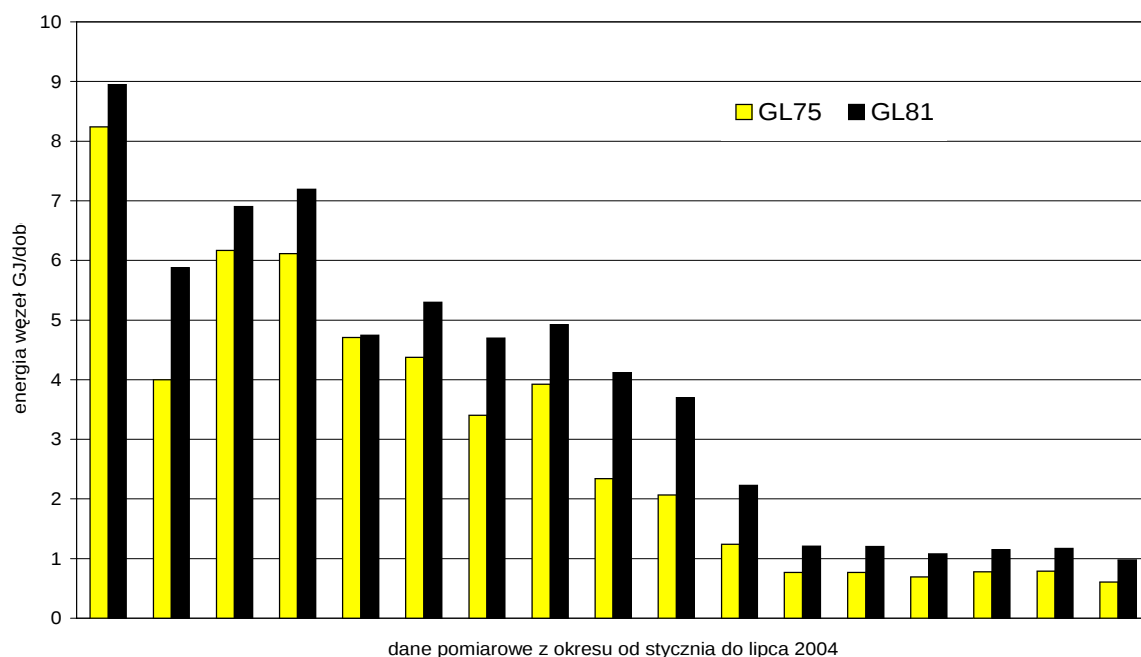
Na rysunku 57 znajduje się porównanie uśrednionego (dobowego) zużycia ciepłej wody użytkowej w węzłach Gliniana 75 oraz Gliniana 81 (dane od stycznia do lipca 2004r.). Zużycie wody w węźle Gliniana 75 jest średnio 1,91 razy mniejsze niż w węźle Gliniana 81. Na podstawie dwuletnich pomiarów zużycie ciepłej wody użytkowej na poszczególnych węzłach wyniosło: $2,39\text{m}^3/\text{dobę}$ – Gliniana 75, $4,78\text{m}^3/\text{dobę}$ – Gliniana 81.



Rysunek 57: Porównanie „zużycia” ciepłej wody w węzłach Gliniana 75 [GL75] oraz Gliniana 81 [GL81]

Na rysunku 58 znajduje się porównanie uśrednionego (dobowego) „zużycia” energii w węzłach Gliniana 75 oraz Gliniana 81 (dane od stycznia do lipca 2004r.). Ilość energii pobieranej przez węzeł Gliniana 75 jest średnio 1,43 razy mniejsze niż w węźle Gliniana 81.

Tak duże różnice pomiędzy poszczególnymi węzłami spowodowane są różną strukturą zamieszkania (ludzie młodzi, emeryci) poszczególnych klatek schodowych oraz różnic w wyposażeniu mieszkań w wodomierze ciepłej wody użytkowej. Na podstawie wywiadu z lokatorami ustalono dużą rozbieżność pomiędzy ilością zastosowanych wodomierzy mieszkaniowych w poszczególnych klatkach schodowych jak i duże różnice w strukturze zamieszkania poszczególnych części budynku (w części budynku zasilanej przez węzeł Gliniana 75 zamieszkują przede wszystkim osoby starsze, w części zasilanej przez węzeł Gliniana 81 osoby aktywne zawodowo). Po rozpadzie wojskowej spółdzielni mieszkaniowej, która zarządzała budynkiem przy ulicy Glinianej, na kilka wspólnot mieszkaniowych nie udało się uzyskać danych dotyczących rzeczywistej ilości osób zamieszkującej budynek. Przy szacunkowej liczbie osób (przyjęto dwie skrajne wartości 90 i 60 osób) zamieszkującej poszczególne fragmenty budynku zasilane z węzłów Gliniana 75 i 81 jednostkowe średnie roczne zużycie ciepłej wody wynosi od 27 do 40 dm³/os dobę dla części budynku zasilanej z węzła Gliniana 75, 53 do 80 dm³/os dobę dla części budynku zasilanej z węzła Gliniana 81.



Rysunek 58: Porównanie „zużycia” energii w węzłach Gliniana 75 [GL75] oraz Gliniana 81 [GL81]

Na podstawie rocznego (od 26.10.2004. do 28.10.2005) zużycia energii węzła ciepłowniczego Gliniana 75 (odczytanego z licznika energii cieplnej przed węzłem - 1056,8GJ), zużycia energii na potrzeby centralnego ogrzewania (odczytanego z licznika energii cieplnej przed wymiennikiem c.o. - 797,4GJ), rocznego zużycia ciepłej wody użytkowej (odczytanego z wodomierza ciepłej wody użytkowej - 900.7m³) oraz przy założeniu średnich rocznych parametrów ciepłej wody użytkowej (temperatury wody zimnej +10°C, ciepłej wody użytkowej +52°C) oszacowano sprawność instalacji ciepłej wody użytkowej węzła definiowaną jako

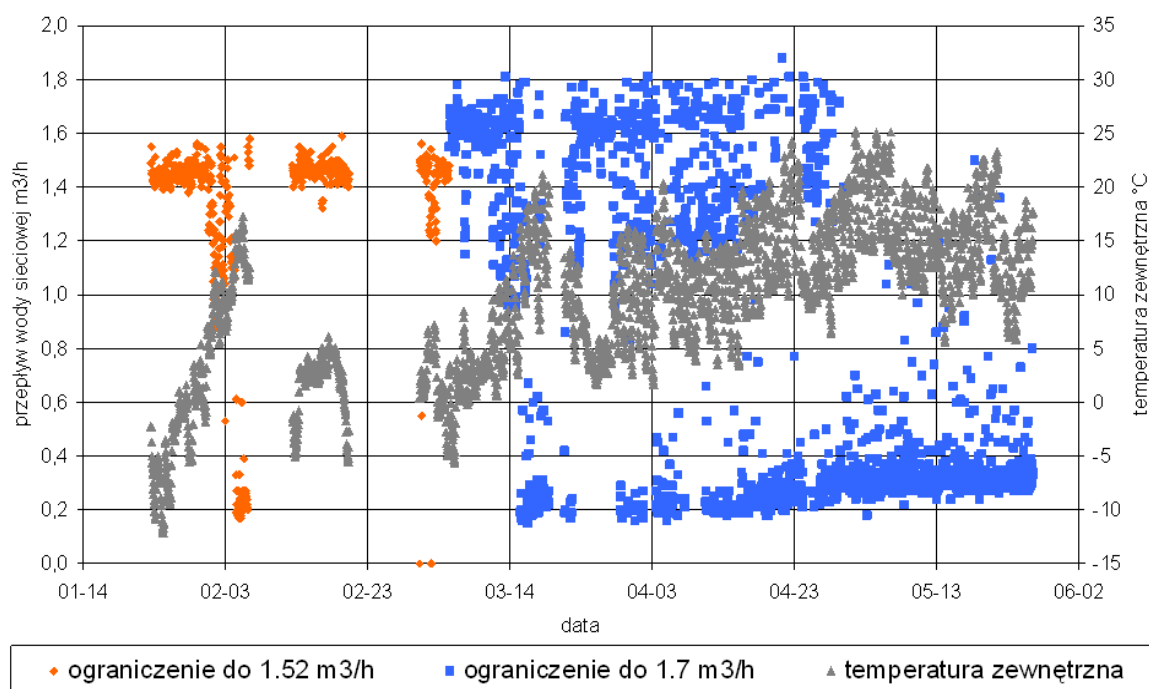
$$\eta_{c.w.u.} = \frac{E_{c.w.u.}}{E_{c.w.u.} + E_{cyrk}} \text{ na poziomie 61\%.}$$

Wniosek:

Ze względu na duże różnice w przepływach ciepłej wody użytkowej oraz energii pobieranej przez oba węzły ciepłownicze można stwierdzić, iż nie powinno się w bezpośredni sposób porównywać pracy węzła Gliniana 81 z pracą węzła Gliniana 75. Wszelkie zatem porównania dotyczące wpływu struktury węzła ciepłowniczego na jego pracę musiały zostać wykonane w węźle badawczym Gliniana 75.

8.1.2 Analiza pracy węzła Gliniana 75

Na rysunku 59 przedstawiono zmienność przepływów wody sieciowej oraz temperatury zewnętrznej w funkcji czasu. Można zauważyć, iż strumień wody sieciowej jest bezpośrednio powiązany z temperaturą zewnętrzną. W początkowym okresie pomiarów (do marca 2004) strumień wody sieciowej wynikający z mocy zamówionej przez wspólnotę mieszkaniową wynosił $1.52 \text{ m}^3/\text{h}$. Na przedstawionym rysunku zmiana ograniczenia strumienia wody sieciowej (mocy zamówionej) jest wyraźnie uwidoczniona. Zakres zmian przepływu wody sieciowej przy ograniczeniu strumienia do $1.52 \text{ m}^3/\text{h}$ jest znacznie mniejszy niż w przypadku zmian strumienia przy ograniczeniu do $1.7 \text{ m}^3/\text{h}$. Jest to spowodowane niedoborem wody sieciowej w stosunku do potrzeb i przez większość okresu praktycznie dwustawną regulacją w tym okresie. Należy zwrócić również uwagę na występowanie w węźle o konfiguracji szeregowo równoległej minimalnego strumienia wody sieciowej na potrzeby cyrkulacji (około $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$).

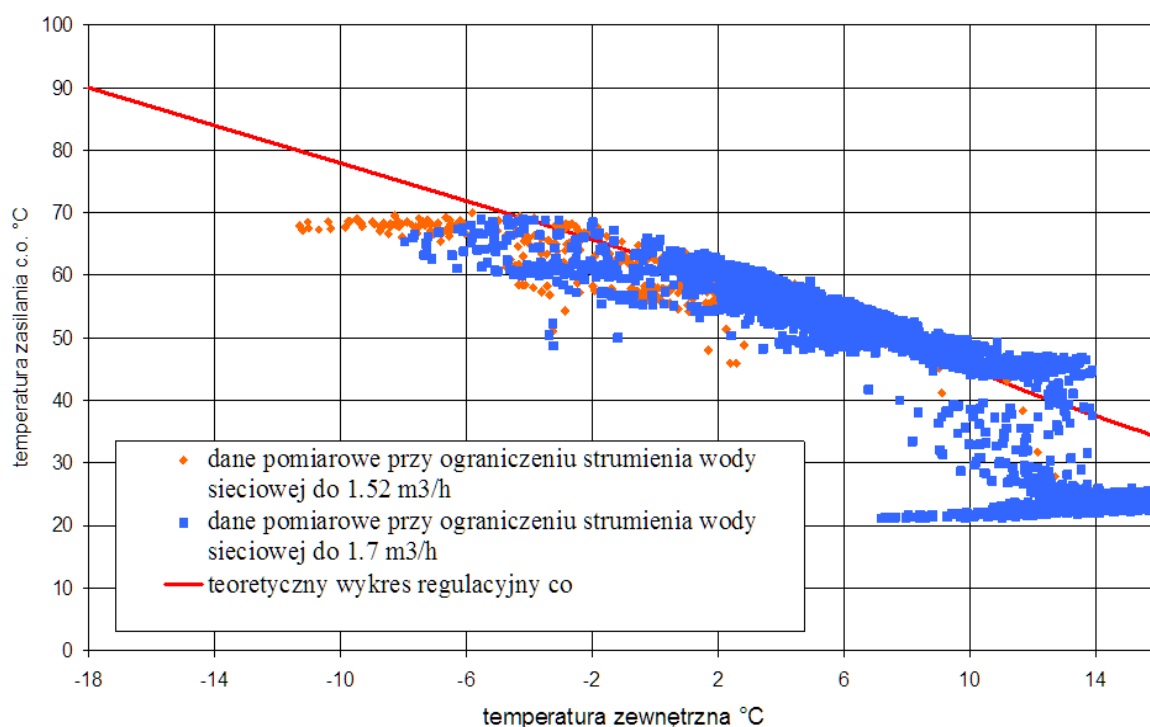


Rysunek 59: Zmienność przepływu wody sieciowej i temperatury zewnętrznej podczas pomiarów (dane od stycznia do czerwca 2004)

Na rysunku 29 (podpunkt 7.3.1) przedstawiono wykres obrazujący zmienność temperatury zasilania sieci ciepłowniczej w funkcji temperatury zewnętrznej (dane z lat 2004-2005). W tym okresie maksymalna temperatura zasilania sieci ciepłowniczej wyniosła około 115°C . Górne

ograniczenie temperatury wody sieciowej (które występowało stosunkowo często przy niskich temperaturach zewnętrznych) powoduje zmniejszenie rzeczywistej mocy zamówionej. Ze względu na zastosowanie w węzłach ograniczników przepływu nie ma możliwości w tym okresie zwiększenia przepływu wody sieciowej przez węzeł a tym samym skompensowania zniżenia temperatury zasilania na sieci ciepłowniczej i ograniczenia dostawy ciepła do węzła ciepłowniczego.

Na rysunku 60 widoczne jest ograniczenie temperatury zasilania instalacji c.o. które jest skutkiem ograniczenia przepływu przez węzeł przy niskich temperaturach zewnętrznych oraz zadziałania funkcji priorytetu c.w.u.

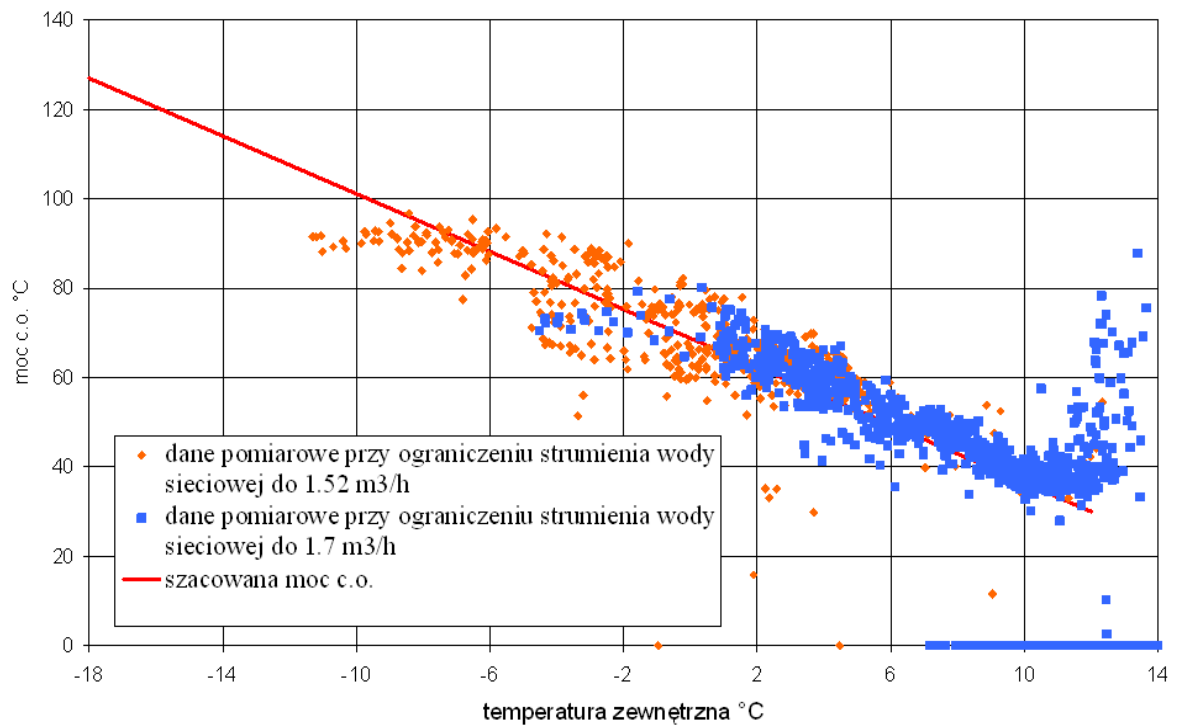


Rysunek 60: Temperatura zasilania c.o. w funkcji temperatury zewnętrznej

Na rysunku 61 przedstawiono chwilową moc c.o. w funkcji temperatury zewnętrznej. Na wykresie można zauważyć ograniczenie mocy c.o. (na poziomie około 90kW) powiązane z ograniczeniem przepływu wody sieciowej, oraz zwiększoną moc na końcu sezonu grzewczego. Na podstawie ekstrapolacji danych pomiarowych można było zweryfikować obliczeniowe zapotrzebowanie na potrzeby centralnego ogrzewania i określić jego wartość na około 127 kW. Jest ona zbliżona do danych obliczeniowych podanych przez MPEC (124 kW).

Zwiększenie mocy na końcu sezonu grzewczego spowodowane jest okresowym działaniem układu c.o. Automatyka wyłącza centralne ogrzewanie powyżej +16°C – w tym okresie najczęściej

podczas dnia – w konsekwencji wychładza się woda w instalacji c.o. W przypadku spadku temperatury – najczęściej podczas nocy – do układu należy doprowadzić zwiększoną ilość ciepła, aby podgrzać wodę instalacyjną do wymaganego (zgodnego z przyjętym wykresem regulacyjnym) poziomu.



Rysunek 61: Moc co w funkcji temperatury zewnętrznej

8.2 Algorytm sterowania

Jednym z celów badań prowadzonych na węźle Gliniana 75 jest opracowanie optymalnego algorytmu sterowania węzłów „pierwszostopniowych”.

Algorytm sterowania układem c.o. w węźle „pierwszostopniowym” jest identyczny jak w przypadku węzła szeregowo-równoległego czy też równoległego. Polega on na utrzymaniu temperatury zasilania c.o. (t_{co}) zgodnej z temperaturą zasilania wyliczoną na podstawie krzywej regulacyjnej i temperatury zewnętrznej. Element wykonawczy stanowi zawór regulacyjny c.o. (ZR_{co}).

Standardowy algorytm sterowania układem c.w.u. (węzły szeregowo-równoległy, równoległy) polega na utrzymaniu stałej temperatury ciepłej wody użytkowej (t_{cw}). Elementem wykonawczym jest zawór regulacyjny c.w.u. (ZR_{cw}). Priorytet ciepłej wody użytkowej uzyskiwany jest poprzez ograniczenie strumienia wody sieciowej dostarczanej do układu c.o. Wymuszenie priorytetu występuje najczęściej przy całkowicie otwartym zaworze ZR_{cw} i niedotrzymaniu wymaganej

temperatury c.w.u. Często też występuje ograniczenie czasowe (np. 30 minut), lub temperaturowe (np. -5°C w stosunku do wymaganej temperatury t_{co}) występowania priorytetu c.w.u. aby nie dopuścić do znaczącego wychłodzenia instalacji c.o.

W standardowych układach węzła szeregowo – równoległego nie jest sterowana temperatura ciepłej wody za wymiennikiem I-st (zabezpieczenie przed przegrzewem c.w.u. przy wysokich temperaturach wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o.).

8.2.1 Węzeł pierwszostopniowy – wersja 1

Algorytm sterowania układem c.w.u. powinien być analogiczny do standardowego algorytmu sterowania węzłów szeregowo-równoległego lub równoległego. Z tego względu nie jest wymagany sterownik swobodnie programowalny z indywidualnie napisanym programem sterującym. Tak jak w każdym przypadku indywidualnie do sterowanego obiektu należy dopasować nastawy regulatora (czas całkowania, zakres proporcjonalności itd.). Ze względu na pośrednią dostawę strumienia wody sieciowej do wymiennika c.w.u. (mieszanie z wodą siecią powracającą z układu c.o.) zaobserwowano większe niż w węzłach szeregowo-równoległym i równoległym opóźnienie zmian temperatury c.w.u. (większa bezwładność układu c.w.u.). W przypadku szybkich zmian przepływu c.w.u. może to doprowadzić do chwilowych kilkustopniowych wahań temperatury c.w.u. W badanym obiekcie Gliniana 75 znaczącą poprawę jakości sterowania uzyskano poprzez zmniejszenie czasu całkowania z 10 do 5 sekund w stosunku do standardowej nastawy.

Brak konieczności zastosowania sterownika swobodnie programowalnego w przypadku małych węzłów ciepłowniczych (np. dla domu jednorodzinnego) w sposób znaczący obniża koszty inwestycyjne.

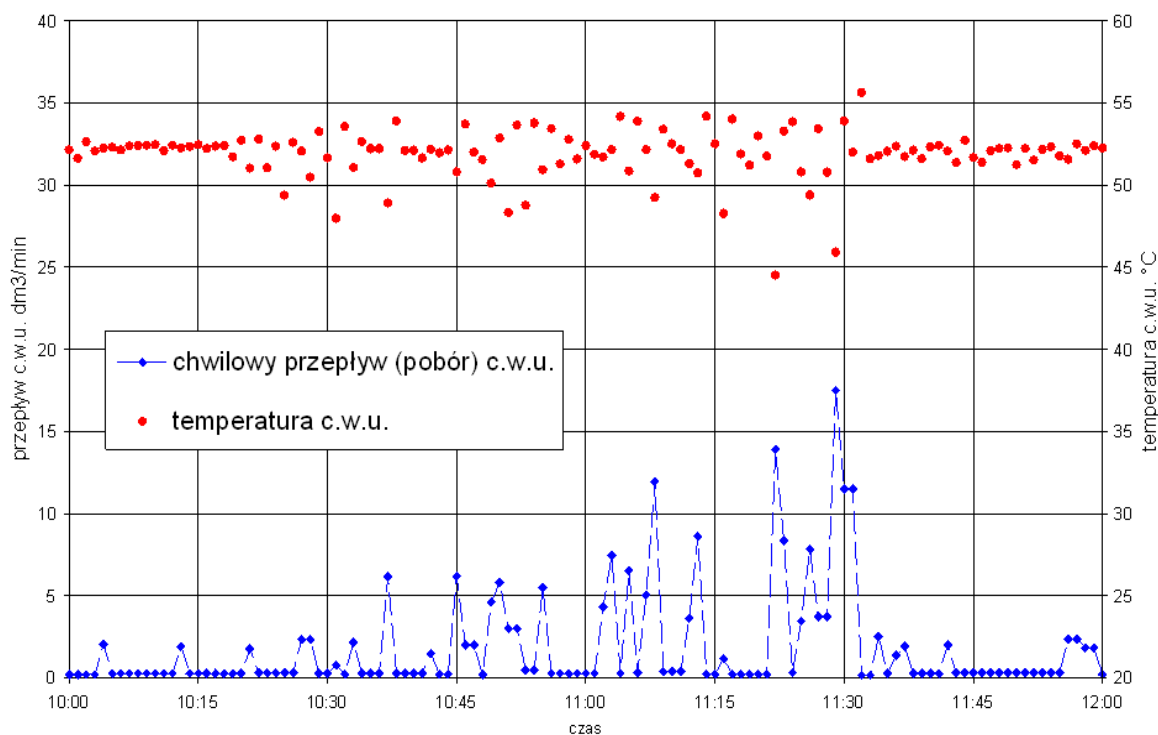
8.2.2 Węzeł pierwszostopniowy – wersja 2

Algorytm sterowania układem c.w.u. polega na utrzymaniu stałej temperatury ciepłej wody użytkowej (t_{cw}) oraz racjonalizacji przepływu i temperatury powrotu wody sieciowej. Elementami wykonawczymi są zawory regulacyjne c.w.u (ZR_{cw} , ZR_{cw2}).

Pierwotnie zakładano utrzymanie stałej temperatury ciepłej wody użytkowej (t_{cw}) (zawór ZR_{cw}) oraz utrzymywanie w okresie przejściowym przez zawór regulacyjny ZR_{cw2} stałej temperatury wody sieciowej przed wymiennikiem c.w.u. ($T_{z\ 1st}$). Badania miałyby za zadanie określenie optymalnej temperatury wody sieciowej przed wymiennikiem c.w.u. oraz określenie warunków granicznych (temperatur zewnętrznych) przy których utrzymywanie tej temperatury było by konieczne.

Na rysunku 62 znajduje się wykres przedstawiający wyniki pomiarów pracy węzła z takim

właśnie algorytmem. Wymagana temperatura c.w.u. wynosi 52°C (standardowa nastawa temperatury we wrocławskim systemie ciepłowniczym), temperatura przed wymiennikiem c.w.u. przyjęta na poziomie 55°C.



Rysunek 62: Praca węzła pierwszostopniowego przy utrzymywaniu stałej temperatury wody sieciowej przed wymiennikiem c.w.u.

Badania zostały przeprowadzone 29.11.2004. Temperatura zewnętrzna wynosiła +8°C, temperatura zasilania wody sieciowej 70°C, temperatura powrotu wody sieciowej z wymiennika c.o. 46°C.

Ze względu na wzajemne oddziaływanie zaworów regulacyjnych ZR_{CW} oraz ZR_{CW2} utrzymanie stabilnej temperatury c.w.u. okazało się praktycznie niemożliwe. Każda zmiana strumienia c.w.u. powodowała pracę (i wzajemne zakłócenia pracy) obydwu zaworów regulacyjnych. Ciągła praca zaworów miałaby bardzo duży wpływ na zmniejszenie czasu pracy (eksploatacji) siłowników. Z tego względu musiano zrezygnować z takiej metody sterowania.

Podczas prac nad algorytmem sprawdzano również rozwiązanie polegające na sterowaniu obejściem wymiennika c.w.u. od strony układu c.o. Polega ono na podziale sygnału sterującego układem c.o z regulatora (sekwencyjna praca zaworów $ZRCO$ i $ZRCW2$). Sygnał 0 - 100% został podzielony w proporcji 50/50% pomiędzy zawory regulacyjne $ZRCO$ (0 - 50%) i $ZRCW2$ (50 - 100%). W teorii przy zbyt małym strumieniu wody sieciowej dopływającej do węzła i całkowicie otwartym zaworze $ZRCO$ otwierałoby się również obejście wymiennika c.w.u.

zwiększając przepływ przez wymiennik c.o. W praktyce jednak ze względu na różnice pomiędzy wymaganą a rzeczywistą temperaturą zasilania na sieci ciepłowniczej oraz nieraz zaniżoną moc (strumień) zamówioną układ obejścia wymiennika bardzo często byłby otwarty bez realnej potrzeby. Przy niskich temperaturach zewnętrznych układ niepotrzebnie pracowałby jak węzeł równoległy co zmniejszyłoby i tak już niedostateczny przepływ wody sieciowej dla węzła. Wymagane byłoby dodatkowe zabezpieczenie w postaci ograniczeń otwarcia zaworu ZRCW2 np. od temperatury zasilania sieci ciepłowniczej.

Najbardziej efektywnym algorytmem sterowania węzła okazało się zastosowanie krzywej ograniczającej przepływ wody sieciowej przez wymiennik c.w.u. uzależnionej od temperatury zasilania sieci ciepłowniczej. Pierwotnie krzywa ograniczając przepływ była uzależniona od temperatury zewnętrznej. W okresie przejściowym i na końcu sezonu grzewczego (kiedy wymagane jest sterowanie obejściem) temperatura zewnętrzna zmienia się jednak w bardzo dużym zakresie podczas gdy temperatura zasilania sieci ciepłowniczej zmienia się nieznacznie w ciągu dnia. Zmiana przepływu przez obejście w takim przypadku (przy stałej temperaturze zasilania sieci) byłaby nieuzasadniona.

Krzywa ograniczająca została zatem utworzona w oparciu o temperaturę zasilania sieci ciepłowniczej. Jako pierwszą wartość graniczną przyjęto temperaturę zasilania sieci równą 80°C. Przy temperaturach wyższych układ działa jak w wersji I (cały strumień wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. kierowany jest na wymiennik c.w.u.). Drugą wartość graniczną przyjęto jako 65°C (najniższa temperatura zasilania sieci ciepłowniczej we wrocławskim systemie ciepłowniczym). Przy tej temperaturze przepływ wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. przez obejście przyjęto jako 60%.

W tym miejscu należy zauważyć, że układ węzła pierwszostopniowego w wersji II-giej charakteryzuje się pewnym stopniem samoregulacji przepływów przez wymiennik c.w.u. i jego obejście. Przy stałym położeniu zaworu ZRCW2 chwilowe zwiększenie przepływu przez zawór ZRCWU powoduje zwiększenie strat ciśnienia wymiennika c.w.u. i tym samym zwiększenie przepływu przez obejście wymiennika. Układ taki jest zatem formą priorytetu c.w.u. Jego "głębokość" uzależniona jest od oporności poszczególnych odcinków (wymiennika c.w.u. i jego obejścia).

W przypadku układu z regulowanym obejściem wymiennika c.w.u. możliwe jest ograniczenie maksymalnej temperatury c.w.u. w przy występowaniu wysokich temperatur wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. (niskie temperatury zewnętrzne) poprzez sterowanie zaworem ZRCW2. W węźle Gliniana 75 maksymalną temperaturę c.w.u. ustalono na 60°C (przy zadanej temperaturze c.w.u. 52°C).

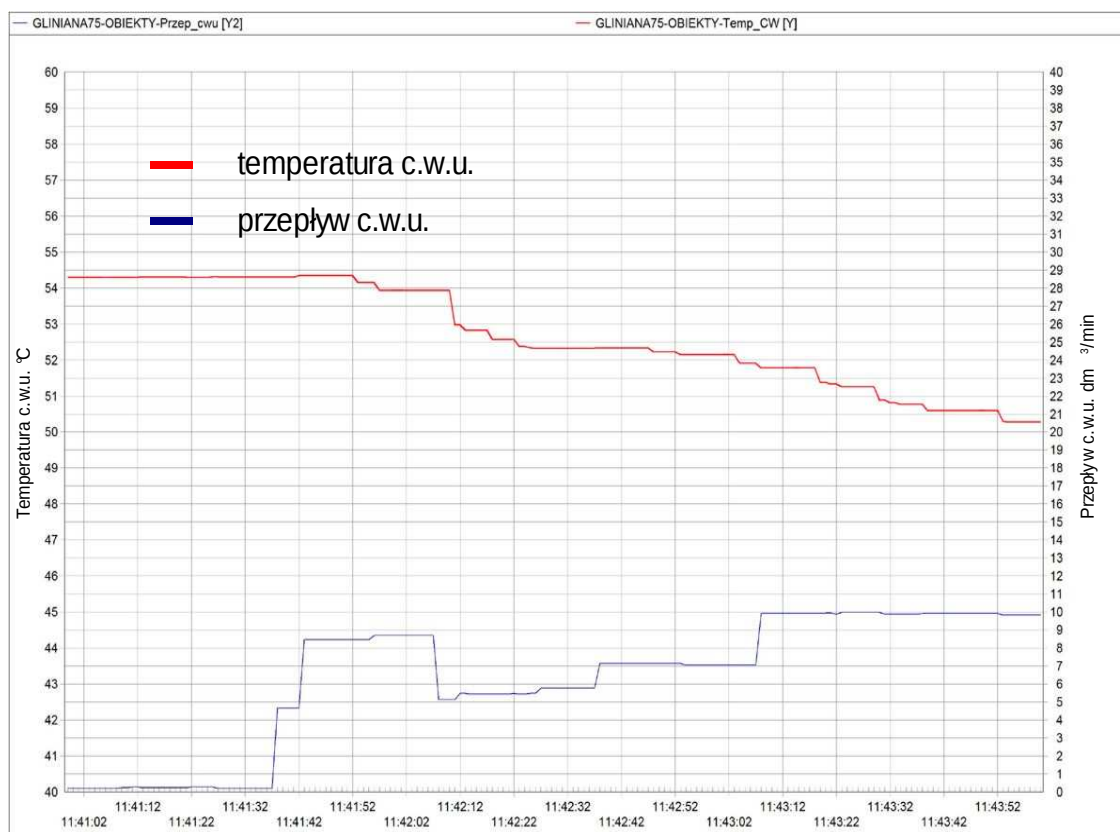
8.3 Wyniki badań

Ze względu na stałe ograniczenie strumienia wody sieciowej na wejściu do węzła, ogranicznik przepływu ustawiony na wartość $1.7\text{m}^3/\text{h}$ (0.47kg/s), nie była możliwa bezpośrednia obserwacja zmian przepływu wody sieciowej w węźle przy jego różnych konfiguracjach. Z tego względu wymagane zmiany przepływu wody sieciowej można obserwować metodą pośrednią analizując chwilowe zmiany strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. (strumień obliczeniowy dla każdego z węzłów jest taki sam). Wymagana zmiana przepływu wody sieciowej na wejściu do węzła spowoduje ograniczenie strumienia wody sieciowej na potrzeby c.o. (wystąpi priorytet c.w.u. o głębokości równej różnicy przepływów pomiędzy teoretycznym strumieniem wody sieciowej a ograniczeniem strumienia wody sieciowej na węźle ciepłowniczym).

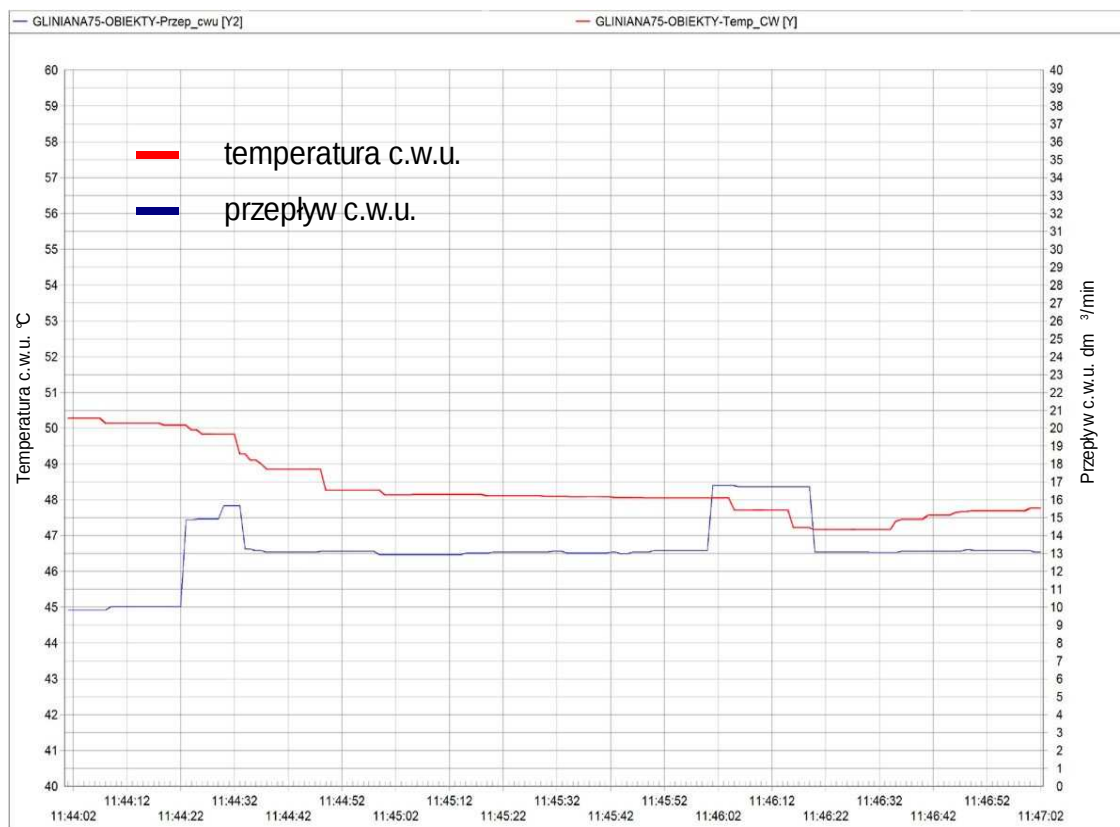
Na podstawie przeprowadzonych w poprzednim rozdziale analiz obliczeniowy strumień ciepłej wody użytkowej został przyjęty na poziomie 0.5 kg/s (30 l/min)

Na rysunkach od 63 do 66 zamieszczono wykresy przedstawiające zmiany temperatury ciepłej wody użytkowej przy jej zmiennym przepływie, uzyskane podczas badań konfiguracji węzła pierwszostopniowego w dniu 18.02.2005r. Temperatura zewnętrzna podczas pomiarów wynosiła 0.9°C , temperatura zasilania sieci ciepłowniczej $T_z\ 94.5^\circ\text{C}$. Wykresy uzyskano bezpośrednio z programu TAC Vista podczas pracy węzła (wykres online).

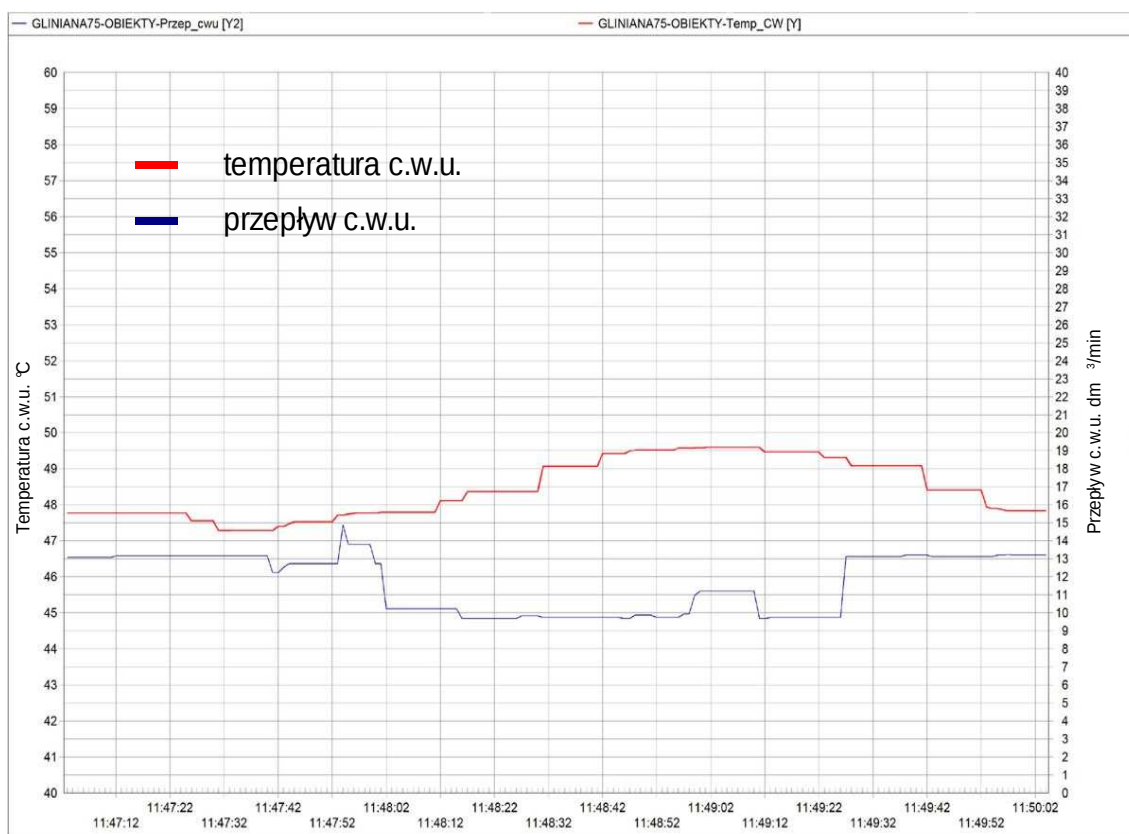
W przypadku 100% przepływu wody powracającej z układu c.o. ($T_{\text{PCO}}=55^\circ\text{C}$) i utrzymującym się średnim strumieniu c.w.u. 12 l/min nie było wymagane otwarcie zaworu regulacyjnego ciepłej wody użytkowej ZR_{CW} . Otwarcie zaworu ZR_{CWU} wystąpiło dopiero przy strumieniu 15 l/min (rys. 66). Taka praca węzła ciepłowniczego jest zgodna z wynikami symulacji przedstawionymi na rysunku 48. Przy braku rozbioru ciepłej wody użytkowej temperatura ciepłej wody użytkowej jest zbliżona do temperatury powrotu wody sieciowej z wymiennika c.o. (T_{PCO}).



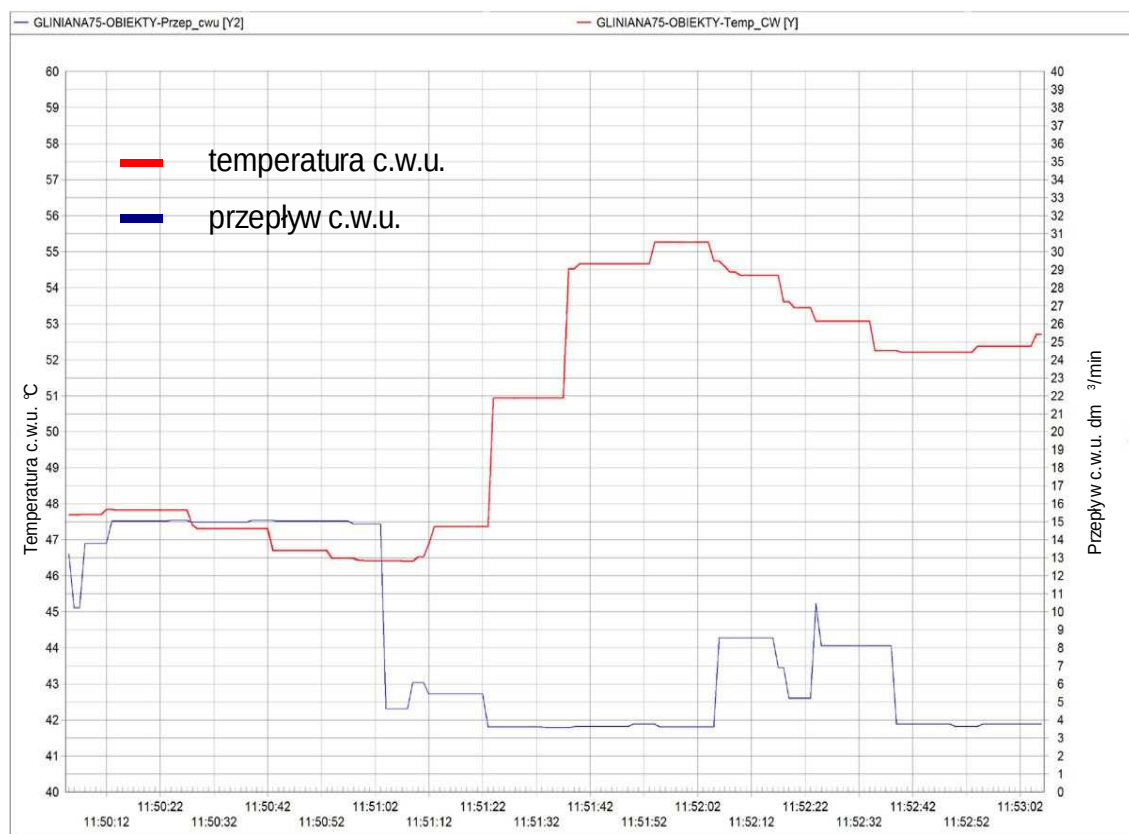
Rysunek 63: Zmiana temperatury ciepłej wody użytkowej przy zmiennym przepływie ciepłej wody użytkowej. Pomiary wartości chwilowych z dnia 18.02.2005



Rysunek 64: Zmiana temperatury ciepłej wody użytkowej przy zmiennym przepływie ciepłej wody użytkowej. Pomiary wartości chwilowych z dnia 18.02.2005 (c.d.)

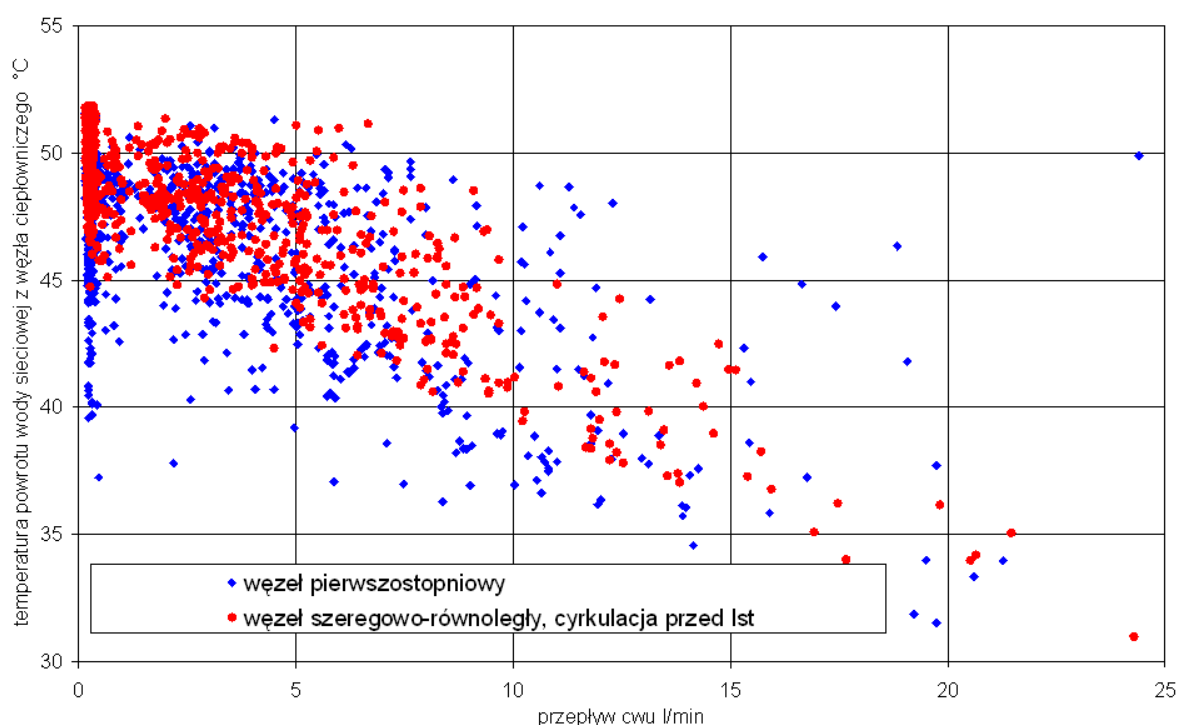


Rysunek 65: Zmiana temperatury ciepłej wody użytkowej przy zmiennym przepływie ciepłej wody użytkowej. Pomiary wartości chwilowych z dnia 18.02.2005 (c.d.)



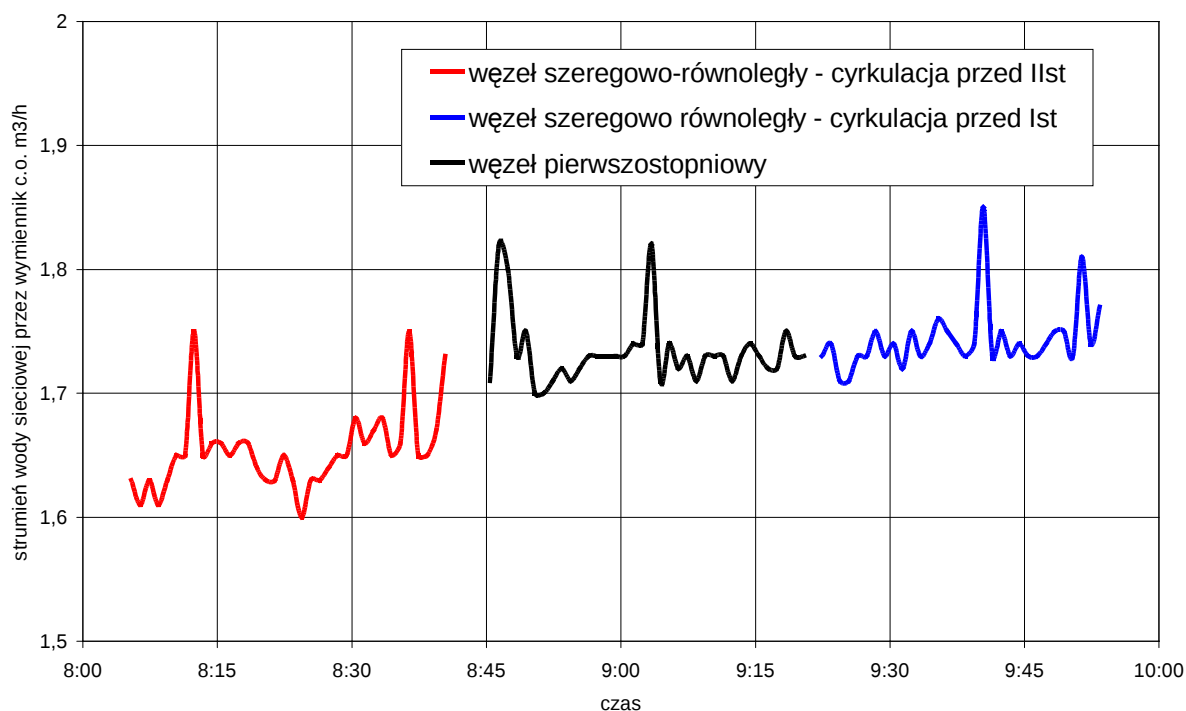
Rysunek 66: Zmiana temperatury ciepłej wody użytkowej przy zmiennym przepływie ciepłej wody użytkowej. Pomiary wartości chwilowych z dnia 18.02.2005 (c.d.)

Na rysunku 67 przedstawiono zmianę temperatury wody sieciowej w funkcji strumienia c.w.u. dla dwóch konfiguracji węzła (szeregowo-równoległy z cyrkulacją przed I-szym stopniem oraz pierwszostopniowy). Dane do wykresu pochodzą z pomiarów w dniu 22 -24 marca 2005 (średnia temperatura zewnętrzna $+2.3^{\circ}\text{C}$, średnia temperatura zasilania sieci 91°C). Na wykresie możemy zauważyć że ze względu na większą powierzchnię wymiennika c.w.u. (w porównaniu do wymiennika I-st węzła szeregowo-równoległego stanowiącego 50% powierzchni) za układem c.o. w węźle pierwszostopniowym przy większych strumieniach c.w.u. uzyskujemy niższe temperatury powrotu sieci.



Rysunek 67: Wpływ strumienia c.w.u. na temperatury powrotu sieci ciepłowniczej

Na rysunku 68 przedstawiono wpływ cyrkulacji na zmianę strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. przy braku rozbioru c.w.u. przy niskich temperaturach zewnętrznych. W przypadku węzła szeregowo-równoległego z cyrkulacją przed II-gim stopniem wymagany był dodatkowy strumień wody sieciowej na potrzeby cyrkulacji. Uzyskana temperatura za wymiennikiem c.w.u. wynosiła 52°C . Przy ograniczeniu strumienia wody sieciowej do $1.7\text{m}^3/\text{h}$ dostarczony do układu c.o. strumień wody sieciowej był mniejszy niż w przypadku układów węzła z cyrkulacją przed I-szym stopniem w których na potrzeby cyrkulacji wykorzystano wodę sieciową powracającą z wymiennika c.o. (temperatura c.w.u. wynosiła średnio 56°C). Różnica w przepływach wynosi około 5%. Pomiary wykonano w dniu 4 marca 2005 przy temperaturze zewnętrznej około -3°C , temperatura zasilania sieci 102°C .

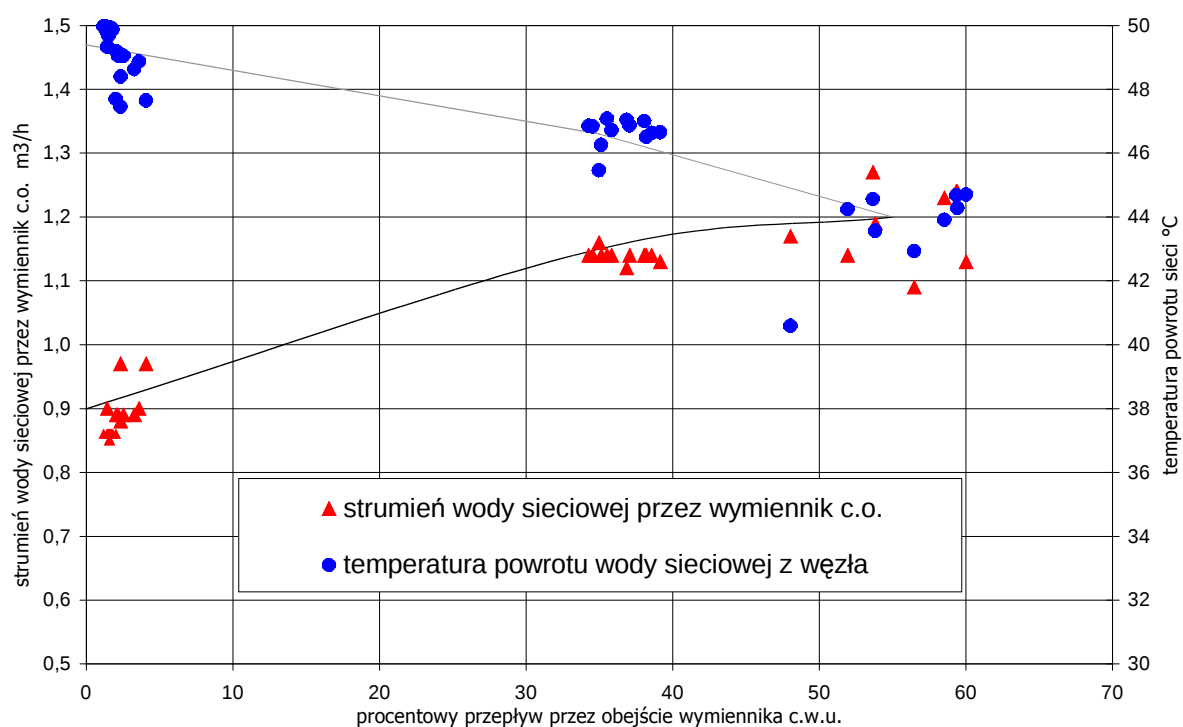


Rysunek 68: Wpływ cyrkulacji na zmianę strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. przy braku rozbioru c.w.u. przy niskich temperaturach zewnętrznych

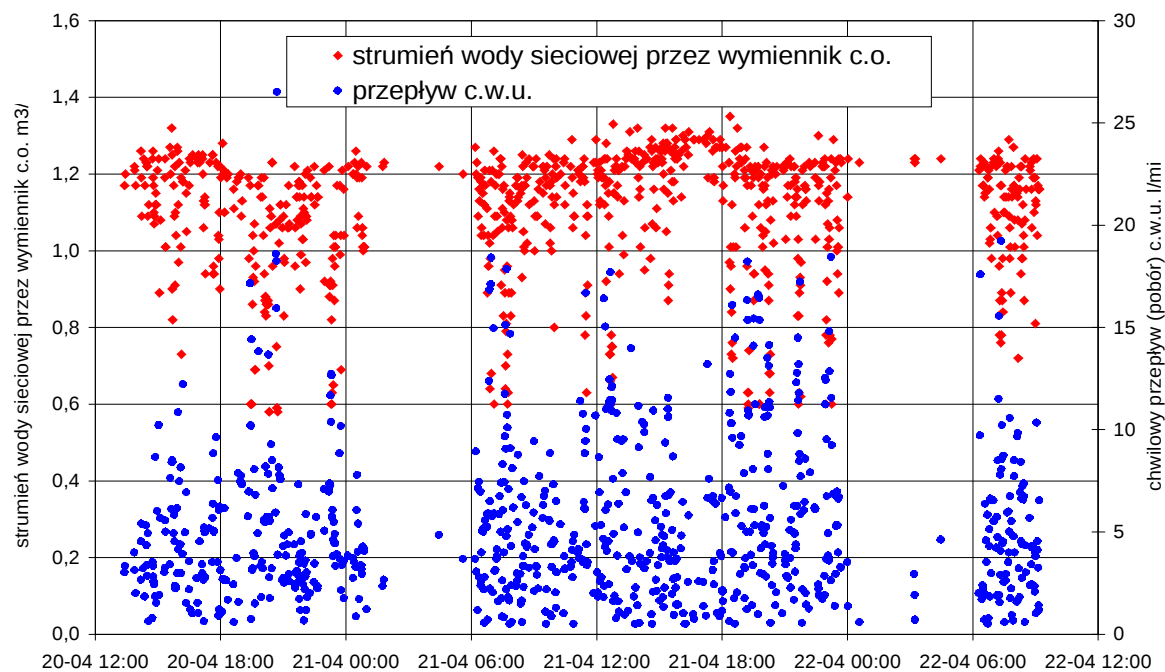
Na rys. 69 przedstawiono zmianę strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. oraz temperatury powrotu wody sieciowej z węzła przy zmianie udziału wody powracającej z c.o. kierowanej na wymiennik c.w.u. Pomiary wykonano w dniu 30 marca 2005 przy temperaturze zewnętrznej $+7.6^{\circ}\text{C}$, temperatura zasilania sieci 67°C (warunki zbliżone do warunków załamania wykresu regulacyjnego). Maksymalna zmiana strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. wynosi 33%, różnica temperatur 6°C . Jest to wartość mniejsza od uzyskanych podczas symulacji (zmiana strumienia wody sieciowej uzyskana z symulacji wynosi 40%).

Na rys. 70 przedstawiono strumienie wody sieciowej przez wymiennik c.o. przy konfiguracji węzła pierwszostopniowego (ograniczenie do 50%) na końcu sezonu grzewczego przy zmiennych przepływach c.w.u. Zakres zmian przepływów c.w.u. Wynosi od 0 do $27\text{dm}^3/\text{min}$ co odpowiada zmianom od 0 do 90% przyjętego obliczeniowego przepływu c.w.u. Strumień wody sieciowej przez wymiennik c.o. waha się w przedziale od 0.58 do $1.35\text{ m}^3/\text{h}$ (maksymalna zmiana $0.77\text{ m}^3/\text{h}$, $\sim 0.21\text{kg/s}$). Wartość zmian przepływów na podstawie symulacji w wariancie z wymiennikami płytowymi i aproksymacją współczynnika k waha się w przedziale od 0.37 do 0.67 kg/s (maksymalna zmiana 0.3kg/s , $\sim 1.08\text{ m}^3/\text{h}$). W węźle badawczym wartość zmian przepływu wynosi zatem 70% zmian przepływu uzyskanych podczas symulacji.

Należy w tym miejscu przypomnieć, że w węźle badawczym obserwujemy zmiany przepływu wody sieciowej metodą pośrednią poprzez obserwację zmian przepływu wody sieciowej przez wymiennik c.o.



Rysunek 69: Zmienność strumienia i temperatury wody sieciowej przy zmianie przepływu przez obejście wymiennika c.w.u.

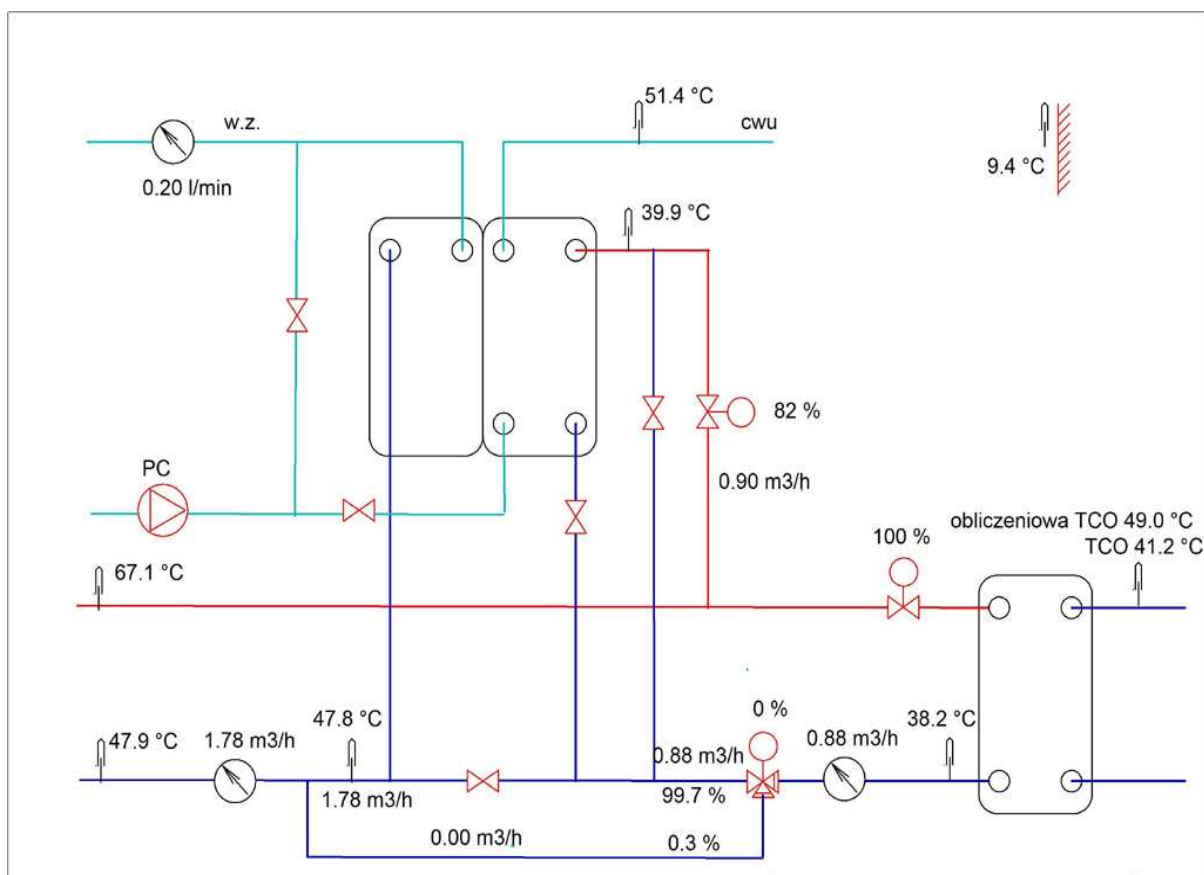


Rysunek 70: Zmiana strumienia wody sieciowej na potrzeby c.o.

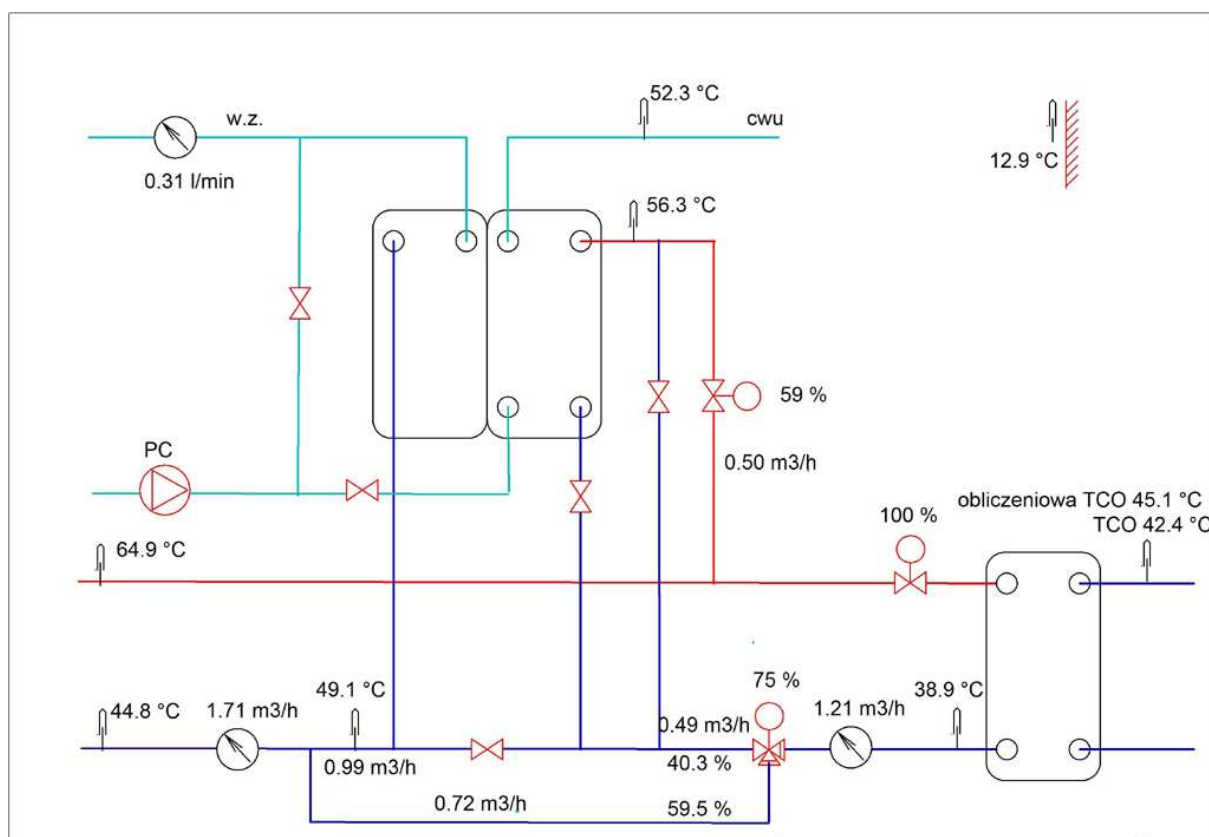
Na rysunkach 71 i 72 przedstawiono obrazy synoptyczne przedstawiające pracę węzła pierwszostopniowego bez (rys. 71), oraz z ograniczeniem przepływu wody sieciowej powracającej z układu c.o. przez wymiennik c.w.u. (rys. 72) przy braku rozbioru c.w.u. W przypadku układu bez obejścia strumień wody sieciowej na potrzeby c.o. jest o 28% mniejszy od strumienia z ograniczeniem do 60%.

Należy również zauważyć, że w pierwszym przypadku układ podgrzewania wody na potrzeby cyrkulacji działa okresowo. Po podniesieniu wody do temperatury 52°C następuje okres w którym temperatura wody sieciowej przed wymiennikiem c.w.u. jest mniejsza od wymaganej (w tym przypadku 39.9°C) a woda cyrkulacyjna oddaje ciepło z powrotem do wody sieciowej. Po obniżeniu się temperatury wody cyrkulacyjnej poniżej temperatury zadanej następuje zwiększenie strumienia wody sieciowej dopływającej do wymiennika c.w.u. i tym samym podniesienie temperatury do wymaganego poziomu. Odbywa się to kosztem dodatkowego obniżenia strumienia wody sieciowej przez wymiennik c.o. W przypadku układu z ograniczeniem strumienia wody sieciowej powracającej z c.o. przez wymiennik c.w.u. taka sytuacja nie występuje.

Takie zachowanie się węzła jest zgodne z wynikami symulacji przedstawionymi na rys.48. Przy nastawionym ograniczeniu strumienia wody sieciowej do wartości 1.7m³/h, ~0.47kg/s, nie ma możliwości zapewnienia poprawnej pracy zarówno instalacji centralnego ogrzewania jak i cyrkulacyjnej. Przy pracy układu bez ograniczenia przepływu wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. strumień obliczeniowy zgodnie z wynikami symulacji powinien wynosić aż 2.5m³/h (0.7kg/s). Obrazy synoptyczne pochodzą z pomiarów w dniach 30.03.2005 (rys. 71) oraz 20.04.2005 (rys. 72)

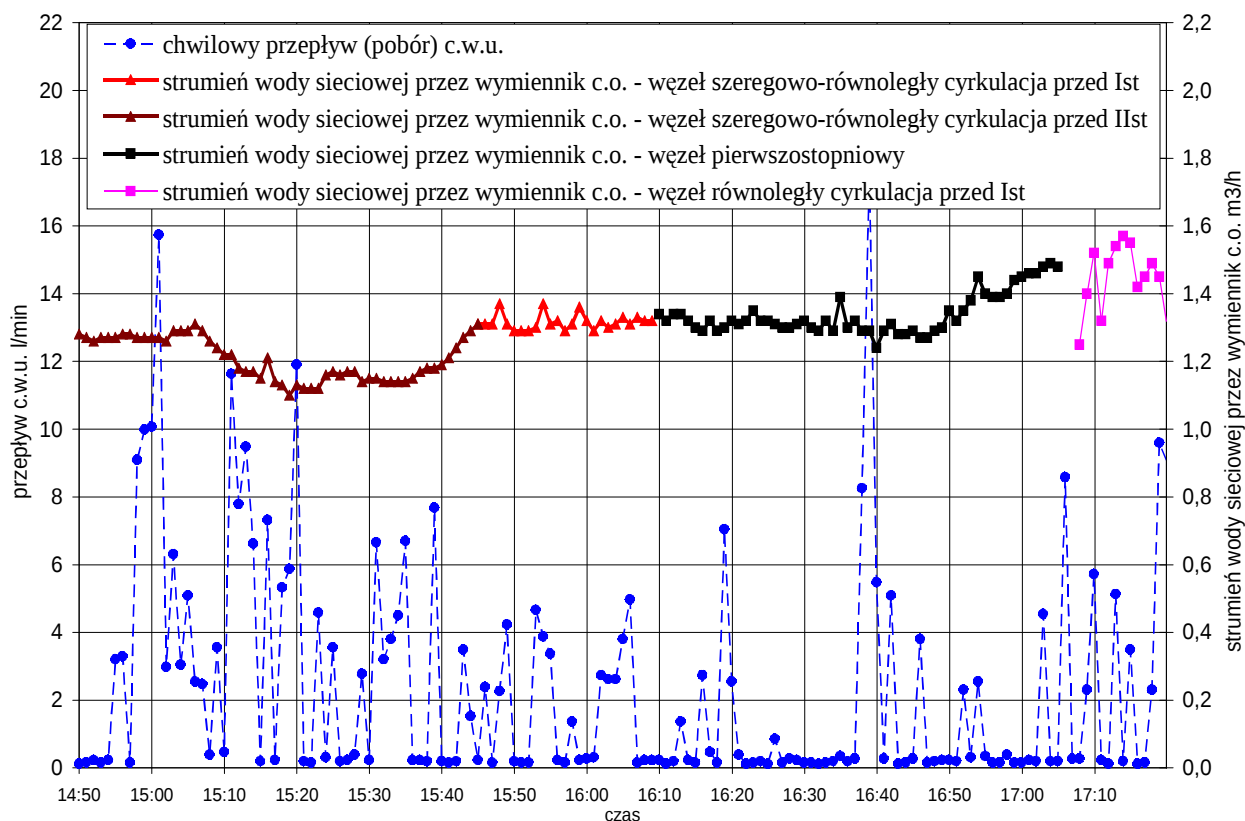


Rysunek 71: Obraz synoptyczny – praca węzła jako pierwszostopniowy wersja 1



Rysunek 72: Obraz synoptyczny – praca węzła jako pierwszostopniowy wersja 2
Przepływ przez obejście 60%

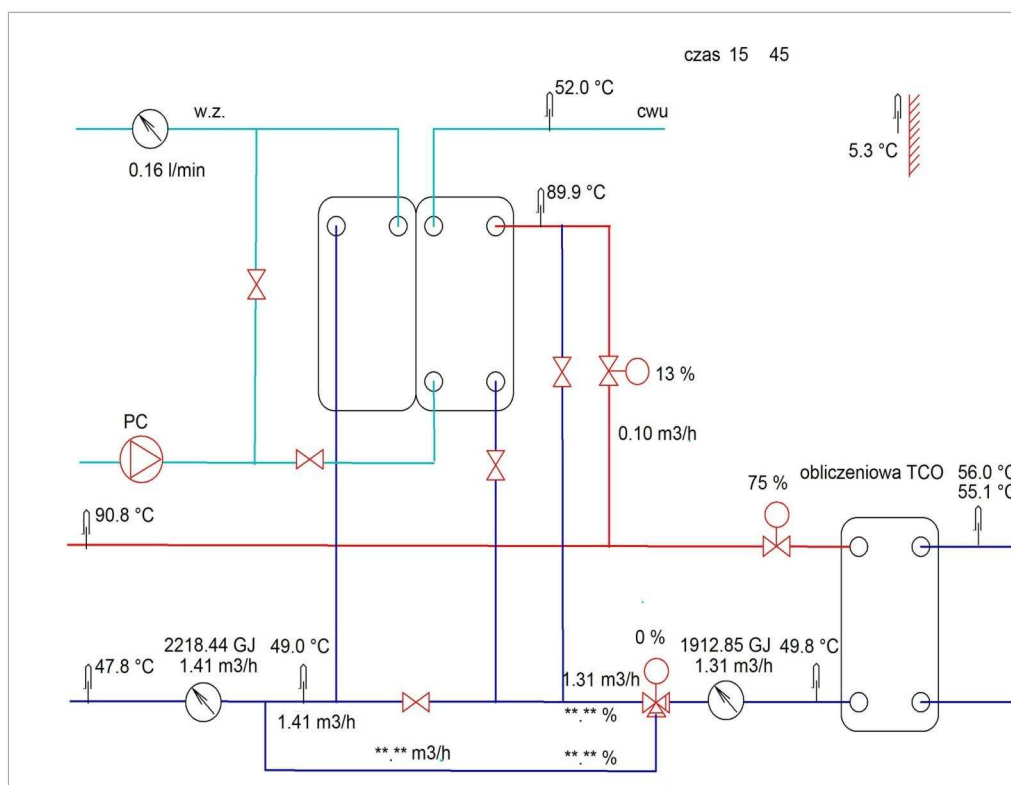
Na rysunku 73 przedstawiono zmiany przepływów wody sieciowej przez wymiennik c.o. przy różnych konfiguracjach węzła i zmiennym przepływie ciepłej wody użytkowej.. Pomiar przeprowadzono w dniu 16.12.2005r. Na rysunkach 74 do 79 przedstawiono przykładowe pomiary chwilowe przy różnych konfiguracjach węzła oraz odpowiadające im obrazy synoptyczne z 16.12.2005r.



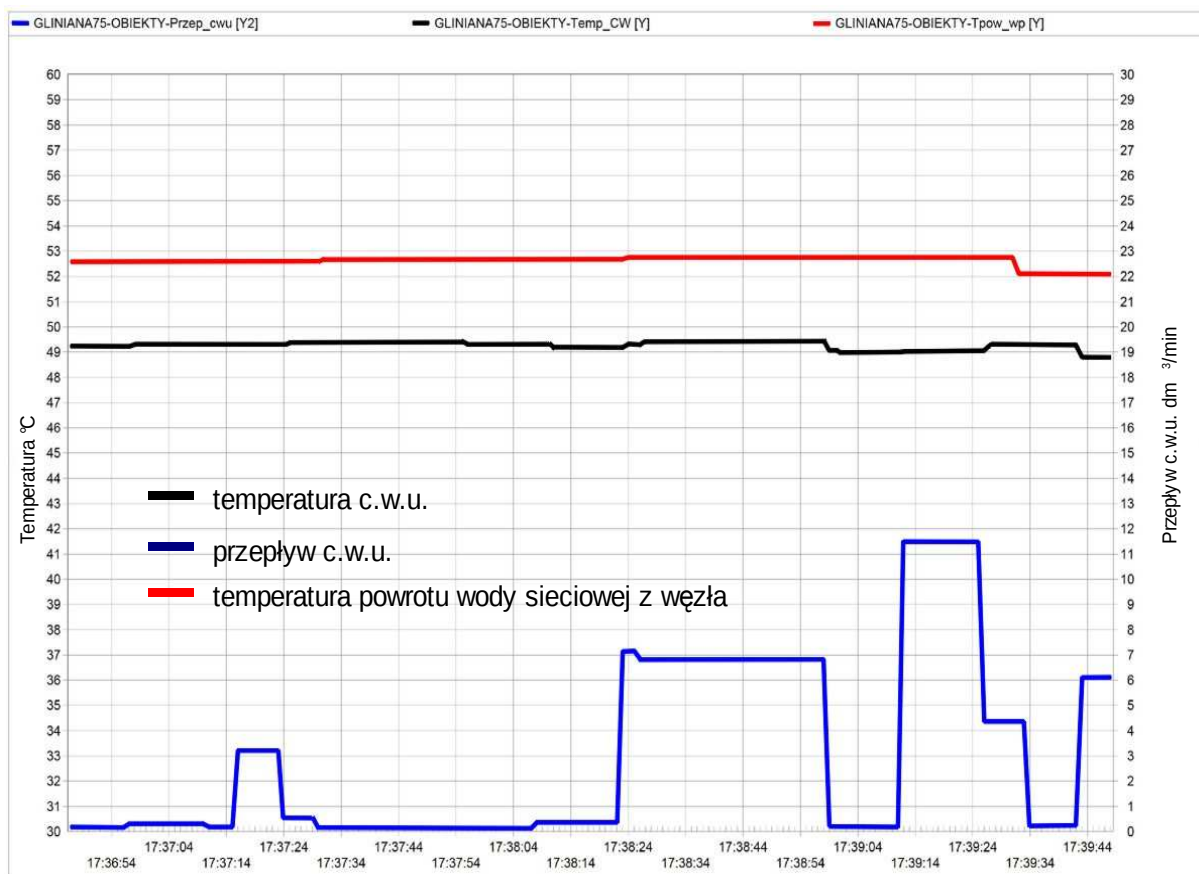
Rysunek 73: Zmiany przepływów wody sieciowej na potrzeby centralnego ogrzewania przy różnych konfiguracjach węzła i zmiennym przepływie c.w.u. Pomiary z 16.12.2005r.

Na podstawie wykresów i obrazów synoptycznych możemy stwierdzić stabilną pracę układów węzła szeregowo-równoległego (rysunki 74, 75) oraz pierwszostopniowego (rysunki 76, 77). W obu przypadkach nagła zmiana przepływu ciepłej wody użytkowej nie spowodowała dużej zmiany w utrzymywanej temperaturze c.w.u. W przypadku węzła równoległego (rysunki 78, 79) pojawienie się przepływu wody sieciowej spowodowała skokowa zmianę temperatury ciepłej wody użytkowej.

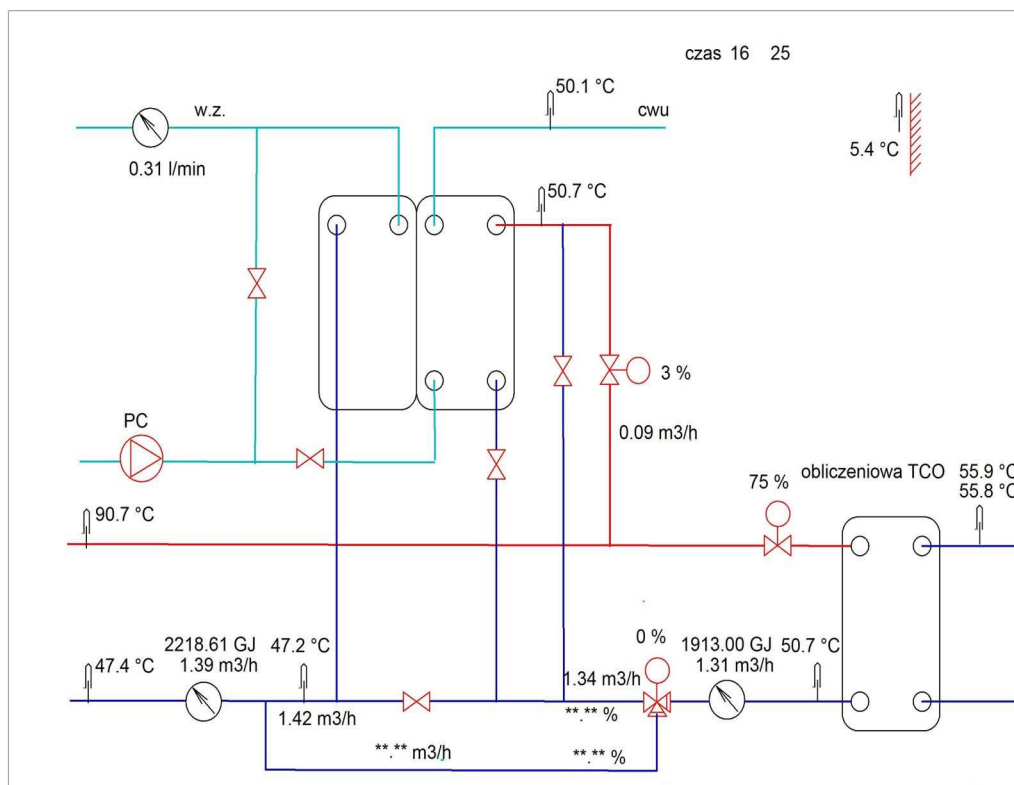
Zgodnie z wynikami symulacji węzeł pierwszostopniowy ma najniższą temperaturę zasilania wymiennika c.o. (50.7°C), gdy w przypadku węzłów szeregowo-równoległego i równoległego temperatura wody sieciowej przed wymiennikiem wynosi 89.8°C .



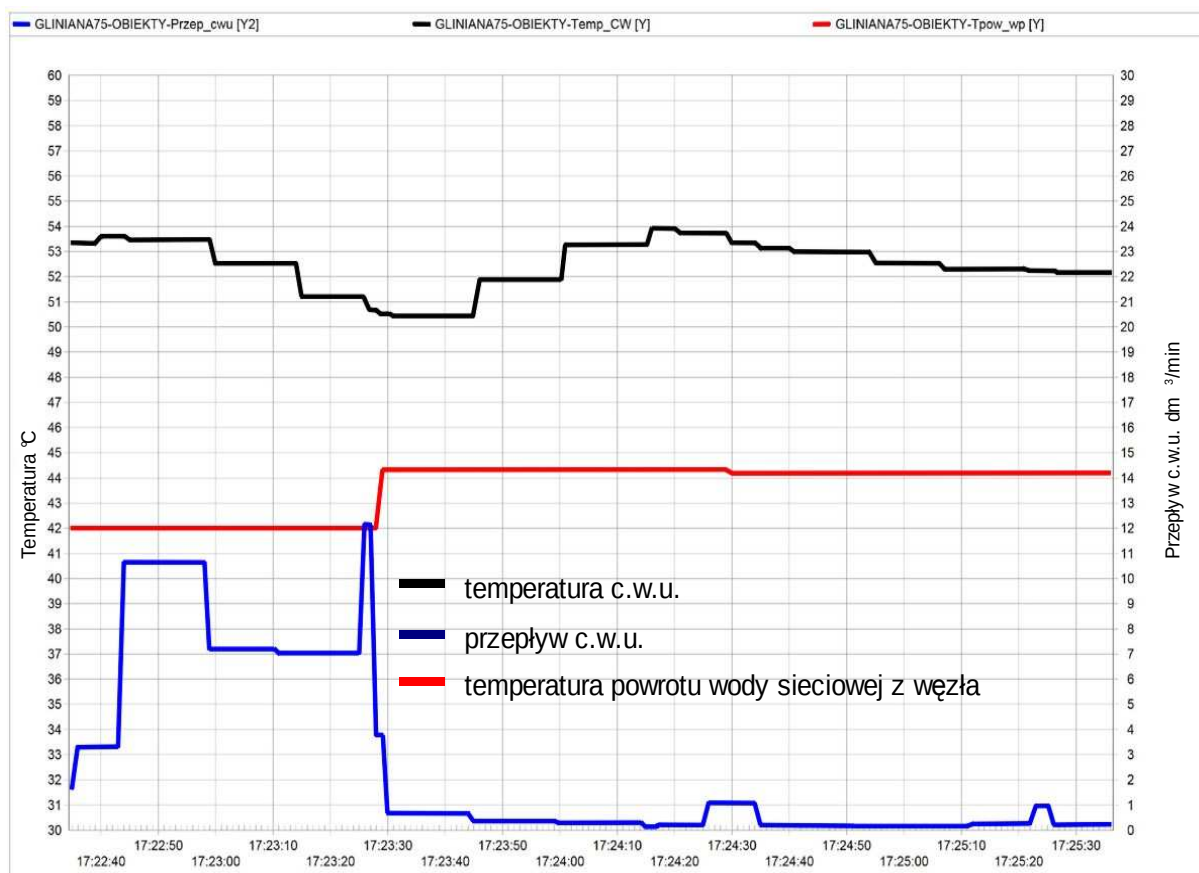
Rysunek 74: Praca węzła w konfiguracji szeregowo-równoległej.
Dane pomiarowe - obraz synoptyczny z 16.12.2005r.



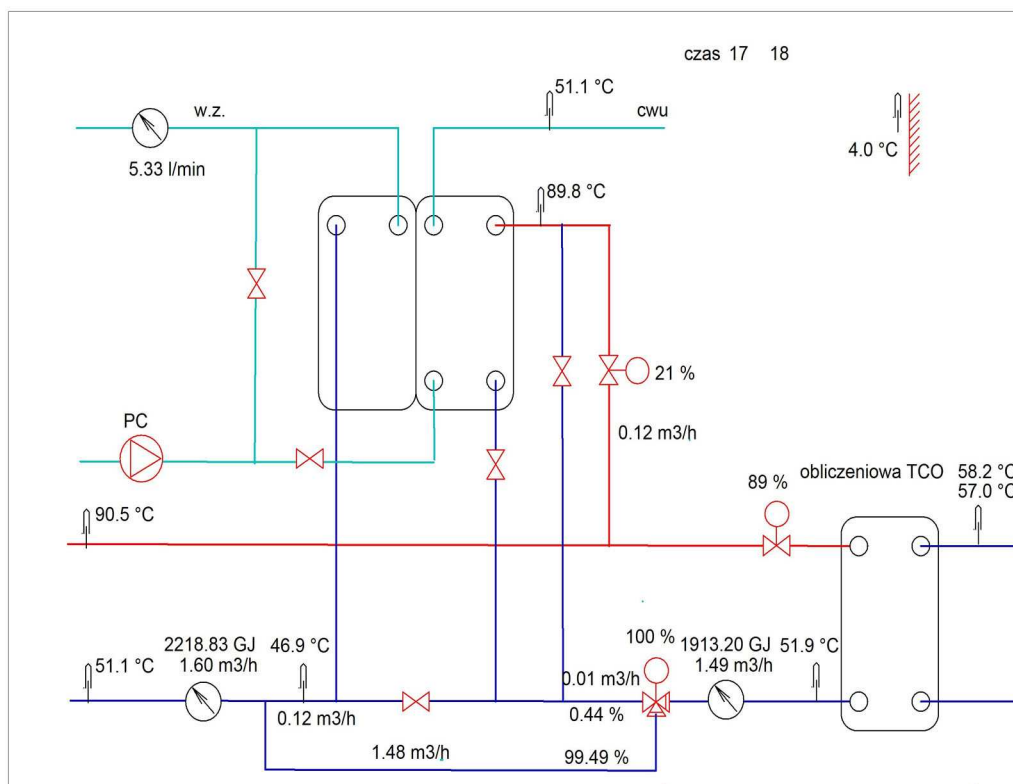
Rysunek 75: Praca węzła w konfiguracji szeregowo-równoległej. Zmiany temperatur c.w.u. i powrotu wody sieciowej przy zmiennym przepływie c.w.u. Dane pomiarowe z 16.12.2005r.



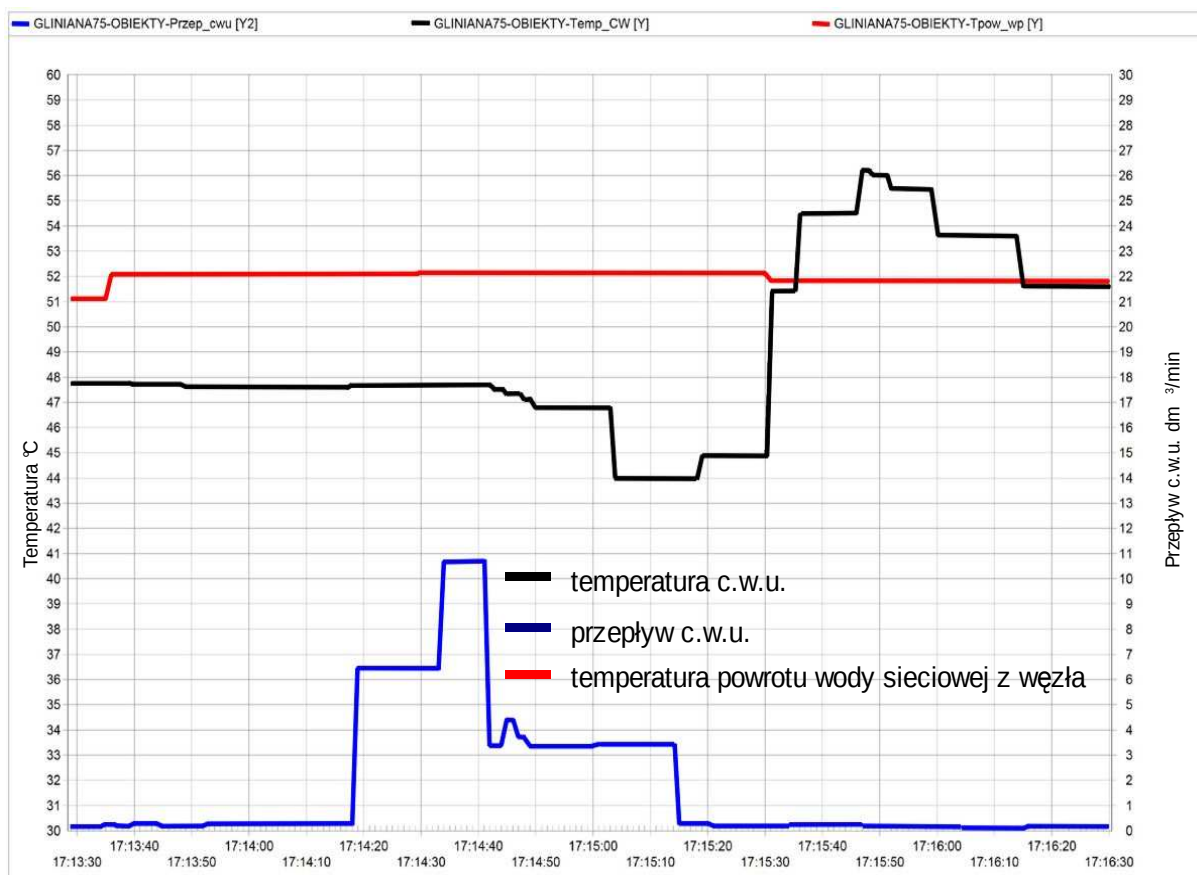
Rysunek 76: Praca węzła w konfiguracji pierwszostopniowej.
Dane pomiarowe - obraz synoptyczny z 16.12.2005r.



Rysunek 77: Praca węzła w konfiguracji pierwszostopniowej. Zmiany temperatur c.w.u. i powrotu wody sieciowej przy zmiennym przepływie c.w.u. Dane pomiarowe z 16.12.2005r..



Rysunek 78: Praca węzła w konfiguracji równoległej.
Dane pomiarowe - obraz synoptyczny z 16.12.2005r.



Rysunek 79: Praca węzła w konfiguracji równoległej. Zmiany temperatur c.w.u. i powrotu wody sieciowej przy zmiennym przepływie c.w.u. Dane pomiarowe z 16.12.2005r.

9. Niepewność pomiarów

9.1 Wstęp

Pomiar wielkości fizycznej polega na jej porównaniu, w określony sposób z wielkością tego samego rodzaju, przyjętą za jednostkę miary. Wszystkie wyniki pomiarów wielkości fizycznych obarczone są pewnymi niepewnościami i błędami. Powoduje to, że zmierzona wartość danej wielkości fizycznej różni się od jej rzeczywistej wartości. Pomiar daje nam tylko wartość przybliżoną, zawartą w przedziale określonym przez stosowaną aparaturę oraz staranność wykonania pomiarów (D. Senczyk [43]).

Niepewność pomiaru jest parametrem związanym z rezultatem pomiaru, charakteryzującym rozrzut wyników, który można w uzasadniony sposób przypisać wartości mierzonej. Terminu „błąd pomiaru” należy używać z znaczeniu jakościowym albo w odniesieniu do różnicy między wartością zmierzoną i rzeczywistą (E. Mulas, R. Rumianowski [44]). Niepewność pomiaru określa przewidywane, przy wysokim poziomie ufności, granice zmienności ostatecznych błędów pomiarów, tzn. tych błędów, których nie udało się skompensować lub wyeliminować w inny sposób (J. Arendarski [45]).

9.2 Niepewność standardowa

Niepewność standardowa jest to niepewność pomiaru odpowiadająca odchyleniu standardowemu wartości średniej. Ocena niepewności typu A oparta jest na metodzie określenia niepewności pomiaru drogą analizy statystycznej serii wyników pomiarów. Ocena niepewności typu B oparta jest na metodzie określenia niepewności drogą inną niż w przypadku A, na przykład na podstawie parametru klasy dokładności przyrządu pomiarowego lub elementarnej działki tego przyrządu (E. Mulas, R. Rumianowski [44]).

Niepewność standardową $u(x)$ bezpośredniego pomiaru wyniku x w ocenie typu A wyraża się wzorem:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9.1)$$

gdzie:

x_i - wyniki kolejnych pomiarów w serii,

n - liczba pomiarów w serii,

$u(x)$ - niepewność standardowa wskazań

Niepewność standardową szacuje się metodą typu B w przypadku gdy jest dostępny tylko jeden wynik pomiaru albo gdy wyniki nie wskazują rozrzutu. Wówczas niepewność standardową ocenia się na podstawie wiedzy o parametrach klasy dokładności przyrządu pomiarowego lub wartości elementarnej działki, tj. niepewności wzorcowania Δx . Przyjmuje się, że wartość Δx jest równa połowie szerokości rozkładu jednostajnego z odchyleniem standardowym

$$u(x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \quad (9.2)$$

Pomiary dzielimy na proste i złożone. Pomiary proste (bezpośrednie) dokonywane są bezpośrednio za pomocą przyrządów pomiarowych, np. pomiar temperatury.

Pomiary złożone (pośrednie) polegają na wyznaczaniu wartości wielkości złożonej na podstawie znanych zależności między różnymi wielkościami mierzonymi bezpośrednio, np. pomiar energii cieplnej, (E. Mulas, R. Rumianowski [44]).

W przypadku pomiarów złożonych wielkości Z określenie niepewności standardowej polega na obliczeniu złożonej niepewności standardowej ze wzoru:

$$u_c(Z) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (9.3)$$

9.3 Niepewność rozszerzona

Niepewność rozszerzona (E. Mulas, R. Rumianowski [44]) jest miarą pewnego przedziału otaczającego wynik pomiaru. Miarę tę obliczamy mnożąc oszacowaną niepewność standardową przez bezwymiarowy współczynnik rozszerzenia (zgodnie z międzynarodową praktyką przyjmuje się umowną wartość $k=2$).

$$U(Z) = k \cdot u_c(Z) \quad (9.4)$$

9.4 Niepewności systematyczne i przypadkowe oraz błędy pomiarów

Ze względu na wpływ na wynik pomiaru rozróżniamy niepewności systematyczne, przypadkowe oraz błędy systematyczne, przypadkowe i grube.

Niepewności systematyczne wpływają zawsze w ten sam sposób na wynik pomiaru tą samą metodą i z użyciem tej samej metody pomiarowej. Pomiary wykonane w jednakowych warunkach wykazują błąd o stałej wartości, przy zmianie warunków o określonej prawidłowości błąd systematyczny wykazuje również pewną prawidłowość lub zachowuje wartość różną od zera. Źródłem błędów systematycznych jest aparatura pomiarowa, stosowana metoda pomiaru,

eksperymentator i środowisko. Błędy systematyczne można zmniejszać udoskonalając metodę pomiaru lub stosowane przyrządy oraz eliminując błędy popełniane przez eksperymentatora lub wpływ środowiska.

Niepewności przypadkowe mają charakter losowy i powodują rozrzut wartości uzyskiwanych w wielokrotnie powtarzanym pomiarze. Źródłem niepewności przypadkowych są właściwości badanego obiektu i stosowanego przyrządu pomiarowego oraz przyczyny fizjologiczne. Niepewności tych nie można wyeliminować, lecz ich wpływ na wynik pomiaru można próbować określić.

Poza niepewnościami istnieją również błędy pomiarowe: systematyczne, przypadkowe i grube (nadmierne). Pochodzenie dwóch pierwszych błędów jest analogiczne do pochodzenia odpowiednich niepewności, natomiast przyczyną błędu grubego jest najczęściej nieuwaga lub niestaranność eksperymentatora.

9.5 Niepewność pomiarów wykonanych w węźle ciepłowniczym Gliniana 75

Pomiary wykonane podczas badań węzła Gliniana 75 odbywały się w warunkach rzeczywistych przy dynamicznie zmieniających się wartościach mierzonych parametrów. Nie było zatem możliwe powtórzenie pomiarów, a co za tym idzie nie ma możliwości określenia niepewności pomiarów drogą analizy statystycznej serii wyników pomiarów (oceny niepewności typu A) dokonywanych w tych samych warunkach pomiarowych.

Ocenę niepewności pomiarów wykonano zatem w oparciu o dokładność przyrządów pomiarowych (ocena niepewności typu B).

Pomiary podczas badań odbywały się przy zastosowaniu systemu komputerowego TAC Vista. W pierwszym okresie pomiarów (od stycznia 2004r. do września 2004r.) odczyt danych ze sterownika odbywał się okresowo, w drugim okresie komputer z systemem TAC Vista został zainstalowany w węźle badawczym.

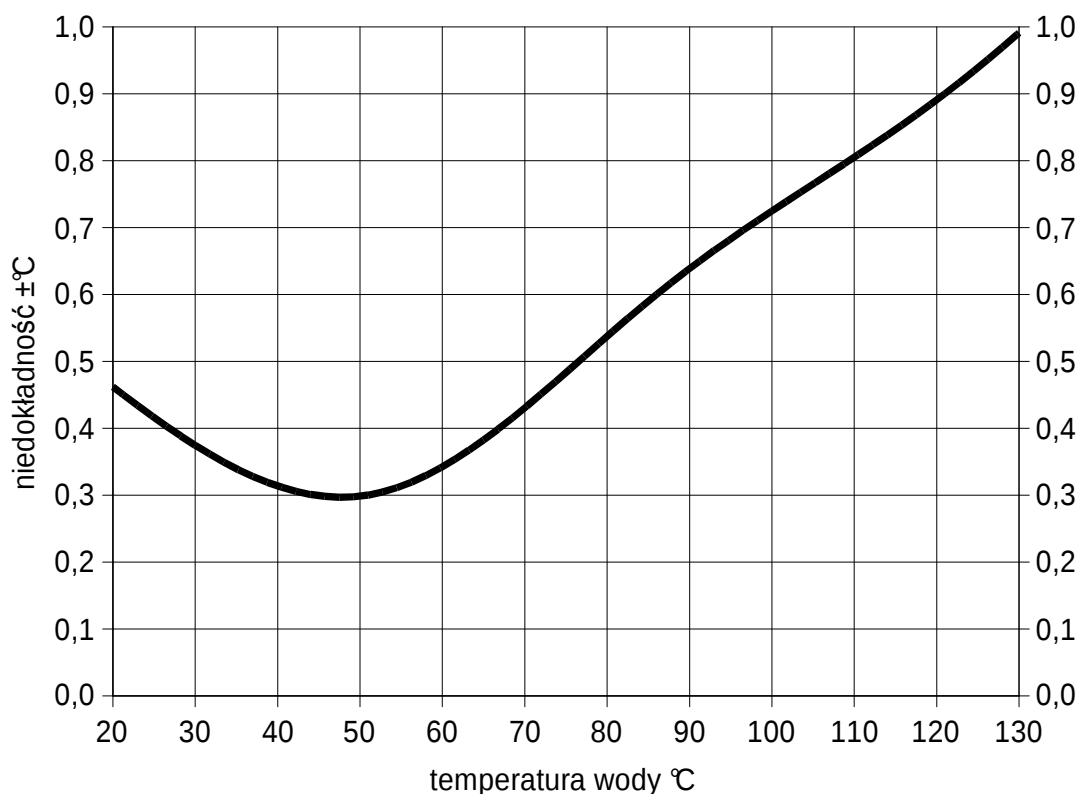
Zastosowanie systemu komputerowego pozwoliło na wyeliminowanie z bezpośrednich pomiarów eksperymentatora co znacząco ograniczyło możliwość popełnienia błędów systematycznych i grubych.

Podczas prac nad modernizacją węzła ciepłowniczego zadbano o poprawne zamontowanie wszystkich urządzeń pomiarowych oraz ich okablowanie zgodne z zaleceniami producentów.

9.5.1 Pomiary temperatur

Pomiar temperatur wody w węźle Gliniana 75 wykonywano za pomocą czujników temperatury EGWS firmy TAC. Producent w karcie katalogowej [46] określił niedokładność pomiaru przy

stosowaniu wyżej wymienionych czujników. Na rysunku 80 przedstawiono wpływ temperatury wody na niedokładność pomiaru temperatury.



Rysunek 80: Niedokładność pomiaru temperatury czujnikami EGWS wg danych producenta (TAC)

Przyjmując wartość graniczną pomiaru temperatury równą $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, zgodnie ze wzorami 9.2 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru temperatury wody wyniesie:

$$u(T) = 2 \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \frac{1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 1.15^\circ\text{C}$$

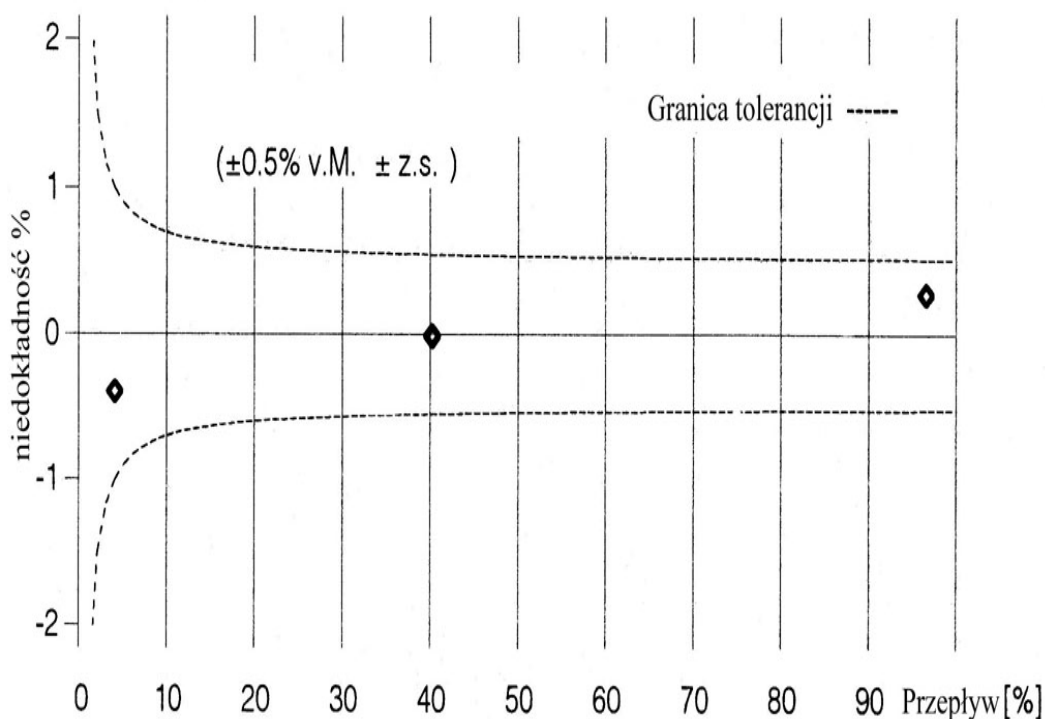
Pomiar temperatury zewnętrznej odbywał się przy pomocy czujnika temperatury zewnętrznej EGU firmy TAC. Producent w karcie katalogowej czujnika [47] określił niedokładność pomiaru temperatury na $\pm 0.6^\circ\text{C}$. Czujnik temperatury został zamontowany zgodnie z wytycznymi montażu (na ścianie północnej budynku, z dala od okien).

$$u(T) = 2 \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \frac{0.6^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.70^\circ\text{C}$$

9.5.2 Pomiary strumienia ciepłej wody użytkowej

Pomiar strumienia ciepłej wody użytkowej odbywał się za pomocą przepływomierza

elektromagnetycznego (indukcyjnego) Promag 50 W DN25 firmy Endress+Hauser. Na rysunku 81 przedstawiono wykres obrazujący niedokładność pomiaru strumienia wody zaczerpnięty z karty kalibracji przepływomierza [48]. Przy strumieniu równym $3\text{dm}^3/\text{min}$ (stanowi to około 2% przepływu nominalnego) niedokładność pomiaru jest równa 2%. Pomiary strumienia poniżej $3\text{dm}^3/\text{min}$ obarczone są nieokreśloną niedokładnością pomiaru i nie powinny być brane pod uwagę w analizach jakościowych.



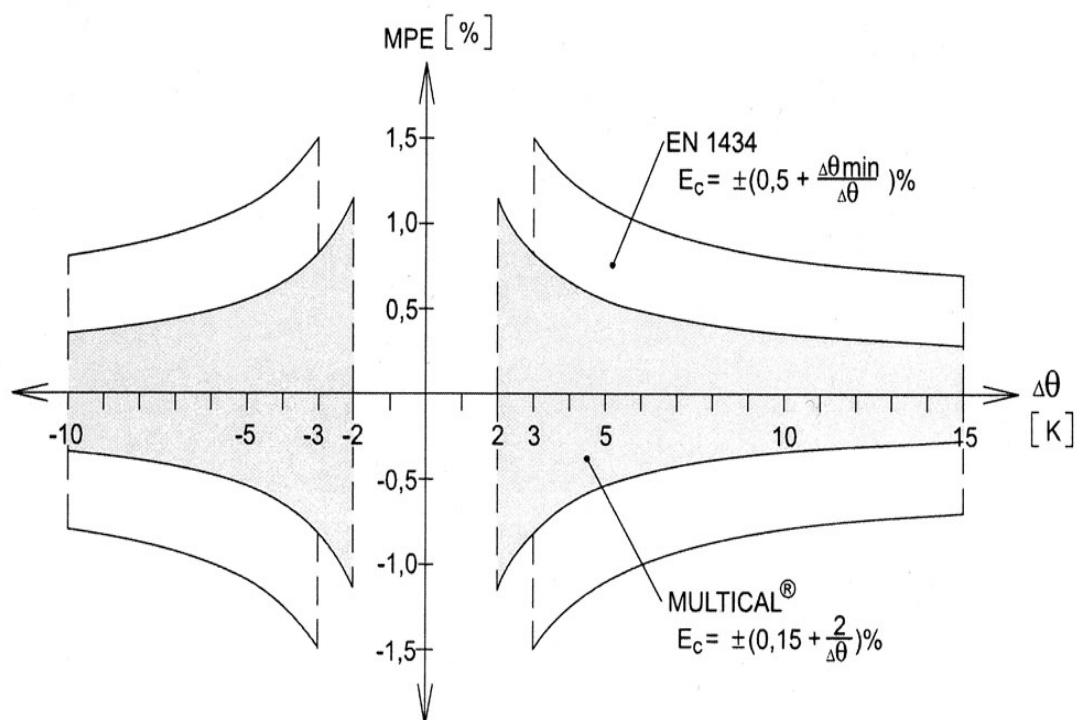
Rysunek 81: Niedokładność pomiaru strumienia wody przepływomierzem Promag 50W DN 25 firmy Endress+Hauser

Przyjmując wartość graniczną pomiaru przepływu wody równą $\Delta V = 0.06\text{dm}^3/\text{min}$ (2% z $3\text{dm}^3/\text{min}$) zgodnie ze wzorami 9.2 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru strumienia wody przepływomierzem wyniesie:

$$u(V) = 2 \cdot \frac{\Delta V}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \frac{0.06 \text{ dm}^3/\text{min}}{\sqrt{3}} = 0.070 \text{ dm}^3/\text{min}$$

9.5.3 Pomiary za pomocą ciepłomierzy

W węźle Gliniana 75 zamontowano dwa ciepłomierze firmy ultradźwiękowe Kamstrup Multical 66c z przetwornikiem przepływu Ultraflow 65s. Ciepłomierze te służyły do pomiaru energii cieplnej, strumieni wody sieciowej, oraz przy pomiarze pośrednim strumieni wody sieciowej V_{SCW} , V_{SP} , V_{OB} , V_{Sist} . Zgodnie z danymi producenta [49] ciepłomierze standardowo posiadają wyższą dokładność od wymaganej normą PN-EN1434 [50] (rys. 82).



Rysunek 82: Porównanie dokładności ciepłomierzy Multical f-my Kamstrup z wymaganiami normy PN-EN 1434

Według danych producenta firmy Kamstrup:

błędy graniczne dopuszczalne względne przepływomierza są opisane wzorem:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot q_p}{q} \right), \text{ nie więcej niż } 2\% \quad (9.5)$$

błędy graniczne dopuszczalne względne pary czujników są opisane wzorem:

$$E_{TD} = \pm \left(0.4 + \frac{4}{\Delta \Theta} \right) \quad (9.6)$$

błędy graniczne dopuszczalne względne ciepłomierza są opisane wzorem:

$$E_C = \pm \left(0.15 + \frac{2}{\Delta \Theta} \right) \quad (9.7)$$

gdzie:

- $\Delta \Theta$ - różnica temperatury czujników zamontowanych na zasilaniu i powrocie,
- q_p - przepływ nominalny ciepłomierza,
- q - przepływ ciepłomierza.

Ciepłomierze zamontowane były po stronie wysokiego parametru, gdzie rejestrowana różnica temperatur między zasilaniem i powrotem była zawsze zdecydowanie wyższa od wymaganej $\Delta \Theta_{min}=2K$. Podczas badań, najmniejsze różnice temperatur na ciepłomierzu głównym zarejestrowano w okresie letnim $\Delta \Theta \approx 15K$, największe przy niskich temperaturach zewnętrznych $\Delta \Theta \approx 80K$. Na ciepłomierzu c.o. najmniejsze różnice temperatur zarejestrowano na końcu sezonu grzewczego $\Delta \Theta \approx 25K$, największe przy niskich temperaturach zewnętrznych $\Delta \Theta \approx 60K$. Błędy graniczne ciepłomierzy wynoszą zatem:

$$\text{ciepłomierz główny} \quad E_C = \pm \left(0.15 + \frac{2}{15} \right) = 0.28\% ,$$

$$\text{ciepłomierz c.o.} \quad E_C = \pm \left(0.15 + \frac{2}{25} \right) = 0.23\% .$$

9.5.4 Niepewność pomiarów pośrednich

1) Niepewność pomiaru strumienia V_{SCW}

$$\dot{V}_{SCW} = \dot{V}_S - \dot{V}_{SCO}$$

rachunek błędu pomiaru strumienia V_{OB} przy dużych niepewnościach systematycznych:

pochodne cząstkowe:

pochodna po V_S równa jest 1

pochodna po V_{SCO} równa jest -1

Zgodnie ze wzorami 9.3 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru strumienia V_{SCW} wynosi:

$$U_c \dot{V}_{SCW} = 1.15 \cdot \sqrt{(1)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_S^2 + (-1)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_{SCO}^2}$$

Dla przykładowych danych z pomiarów z dnia 20.04.2005 (rys. 72) niepewność rozszerzona pomiaru strumienia V_{SCW} wynosi:

przy przepływie nominalnym $3m^3/h$ oraz zmierzonym przepływie $V_S=1.71m^3/h$:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3m^3/h}{1.71m^3/h} \right) = 1.02\% ,$$

$$\Delta g \dot{V}_S = 1.71 \cdot 0.0102 = 0.018m^3/h ,$$

przy przepływie nominalnym $3m^3/h$ oraz zmierzonym przepływie $V_{SCO}=1.21m^3/h$:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3m^3/h}{1.21m^3/h} \right) = 1.03\% ,$$

$$\Delta g \dot{V}_{SCO} = 1.21 \cdot 0.0103 = 0.013m^3/h$$

$$V_S = 1.71m^3/h \quad \pm 0.018m^3/h,$$

$$V_{SCO} = 1.21m^3/h \quad \pm 0.013m^3/h,$$

niepewność rozszerzona wynosi 0.026m³/h.

2) Niepewność pomiaru strumienia V_{OB}

$$\dot{V}_{OB} = \dot{V}_S \cdot \left(1 - \frac{T_P - T_{PCO}}{T_{PCW} - T_{PCO}} \right)$$

rachunek błędu pomiaru strumienia V_{OB} przy dużych niepewnościach systematycznych:

pochodne cząstkowe:

pochodna po V_S $1 - \frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po T_P $-\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po T_{PCO} $\dot{V}_S \cdot \left(-\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)$

pochodna po T_{PCW} $\frac{\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2}$

Zgodnie ze wzorami 9.3 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru strumienia V_{OB} wynosi:

$$U_c \dot{V}_{OB} = 1.15 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_S^2 + \left(-\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g T_P^2 + \left(\dot{V}_S \cdot \left(-\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right) \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCO}^2 + \left(\frac{\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCW}^2}$$

Dla przykładowych danych z pomiarów z dnia 20.04.2005 (rys. 72) niepewność rozszerzona pomiaru strumienia V_{OB} wynosi:

przy przepływie nominalnym 3m³/h oraz zmierzonym przepływie 1.71m³/h:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3 \text{ m}^3/\text{h}}{1.71 \text{ m}^3/\text{h}} \right) = 1.02 \%$$

$$\Delta g \dot{V}_S = 1.71 \cdot 0.0102 = 0.018 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_S = 1.71 \text{ m}^3/\text{h} \quad \pm 0.018 \text{ m}^3/\text{h},$$

$$T_P = 44.8^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

$$T_{PCW} = 49.1^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

$$T_{PCO} = 38.9^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

niepewność rozszerzona wynosi 0.060m³/h.

3) Niepewność pomiaru strumienia $\dot{V}_{S_{Ist}}$.

$$\dot{V}_{S_{Ist}} = \frac{\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(T_{PCW} - T_{PCO})}$$

rachunek błędu pomiaru strumienia $\dot{V}_{S_{Ist}}$ przy dużych niepewnościach systematycznych:

pochodne cząstkowe:

pochodna po $\dot{V}_S$ $\frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po T_P $\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po T_{PCO} $\dot{V}_S \cdot \left(\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)$

pochodna po T_{PCW} $\frac{\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2}$

Zgodnie ze wzorami 9.3 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru strumienia $\dot{V}_{OB}$ wynosi:

$$U_c \dot{V}_{S_{Ist}} = 1.15 \cdot \sqrt{\left(\frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_S^2 + \left(\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g T_P^2 + \left(\dot{V}_S \cdot \left(\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right) \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCO}^2 + \left(\frac{\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCW}^2}$$

Dla przykładowych danych z pomiarów z dnia 20.04.2005 (rys. 72) niepewność rozszerzona pomiaru strumienia $\dot{V}_{OB}$ wynosi:

przy przepływie nominalnym $3\text{m}^3/\text{h}$ oraz zmierzonym przepływie $1.71\text{m}^3/\text{h}$:

$$E_{pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3\text{m}^3/\text{h}}{1.71\text{m}^3/\text{h}} \right) = 1.02\%$$

$$\Delta g \dot{V}_S = 1.71 \cdot 0.0102 = 0.018\text{m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_S = 1.71\text{m}^3/\text{h} \quad \pm 0.018\text{m}^3/\text{h},$$

$$T_P = 44.8^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

$$T_{PCW} = 49.1^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

$$T_{PCO} = 38.9^\circ\text{C} \quad \pm 0.30^\circ\text{C},$$

niepewność rozszerzona wynosi $0.06\text{m}^3/\text{h}$.

4) Niepewność pomiaru strumienia $\dot{V}_{SP}$.

$$\dot{V}_{SP} = \dot{V}_{SCO} - \dot{V}_{OB}$$

$$\dot{V}_{SP} = \dot{V}_{SCO} - \dot{V}_S \cdot \left(1 - \frac{T_P - T_{PCO}}{T_{PCW} - T_{PCO}} \right)$$

rachunek błędu pomiaru strumienia V_{SP} przy dużych niepewnościach systematycznych:

pochodne cząstkowe:

pochodna po V_S $-1 + \frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po V_{SCO} 1

pochodna po T_P $\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}}$

pochodna po T_{PCO} $-\dot{V}_S \cdot \left(-\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)$

pochodna po T_{PCW} $\frac{-\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2}$

Zgodnie ze wzorami 9.3 i 9.4 niepewność rozszerzona z przyjętym współczynnikiem rozszerzenia $k=2$, współczynnikiem ufności 0.95 pomiaru strumienia V_{S1st} wynosi:

$$U_c \dot{V}_{S1st} = 1.15 \cdot \sqrt{\left(-1 + \frac{T_P - T_{PCO}}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_S^2 + (1)^2 \cdot \Delta g \dot{V}_{SCO}^2 + \left(\frac{\dot{V}_S}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right)^2 \cdot \Delta g T_P^2 + \left(-\dot{V}_S \cdot \left(-\frac{T_P - T_{PCO}}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} + \frac{1}{-T_{PCO} + T_{PCW}} \right) \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCO}^2 + \left(\frac{-\dot{V}_S \cdot (T_P - T_{PCO})}{(-T_{PCO} + T_{PCW})^2} \right)^2 \cdot \Delta g T_{PCW}^2}$$

Dla przykładowych danych z pomiarów z dnia 20.04.2005 (rys. 72) niepewność rozszerzona pomiaru strumienia V_{S1st} wynosi:

przy przepływie nominalnym $3\text{m}^3/\text{h}$ oraz zmierzonym przepływie $1.71\text{m}^3/\text{h}$:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3\text{m}^3/\text{h}}{1.71\text{m}^3/\text{h}} \right) = 1.02\%$$

$$\Delta g \dot{V}_S = 1.71 \cdot 0.0102 = 0.018\text{m}^3/\text{h}$$

przy przepływie nominalnym $3\text{m}^3/\text{h}$ oraz zmierzonym przepływie $V_{SCO} = 1.21\text{m}^3/\text{h}$:

$$E_{Pd} = \pm \left(1 + \frac{0.01 \cdot 3\text{m}^3/\text{h}}{1.21\text{m}^3/\text{h}} \right) = 1.03\%$$

$$\Delta g \dot{V}_{SCO} = 1.21 \cdot 0.0103 = 0.013\text{m}^3/\text{h}$$

$$V_S = 1.71\text{m}^3/\text{h} \pm 0.018\text{m}^3/\text{h},$$

$$V_{SCO} = 1.21\text{m}^3/\text{h} \pm 0.013\text{m}^3/\text{h},$$

$$T_p = 44.8^{\circ}\text{C} \quad \pm 0.30^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{PCW}} = 49.1^{\circ}\text{C} \quad \pm 0.30^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{PCO}} = 38.9^{\circ}\text{C} \quad \pm 0.30^{\circ}\text{C},$$

niepewność rozszerzona wynosi $0.06\text{m}^3/\text{h}$.

10.Wnioski

Celem pracy była racjonalizacja warunków pracy wielofunkcyjnych węzłów ciepłowniczych na przykładzie dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego w wielorodzinnym budynku mieszkalnym, oparta na analizie wyników uzyskanych z teoretycznego modelu węzła oraz badań eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie.

W wyniku przeprowadzonych prac poddano analizie węzły z jednostopniowym wymiennikiem c.w.u. zasilanym szeregowo-równoległe wodą sieciową nazywane przez Autora „węzłami pierwszostopniowymi” i porównano ich pracę ze standardowymi węzłami dwufunkcyjnymi (równoległym i szeregowo-równoległym). Aby osiągnąć wymagany cel zbudowano nowy oryginalny model symulacyjny (program symulacyjny) węzła ciepłowniczego pozwalający na analizę pracy węzłów ciepłowniczych o różnej konfiguracji i zadanych parametrach wejściowych, oraz zbudowano stanowisko badawcze na rzeczywistym obiekcie (budynku mieszkalnym) pozwalające na badanie różnych konfiguracji węzłów ciepłowniczych.

1. Opracowany oryginalny teoretyczny model symulacyjny węzła ciepłowniczego umożliwia wykonanie analizy przepływów wody sieciowej w całym sezonie grzewczym. Model ten może być podstawą do racjonalizacji warunków pracy wielofunkcyjnych węzłów ciepłowniczych. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz badań na obiekcie rzeczywistym można stwierdzić, że istnieje możliwość przeprowadzenia analizy pracy węzłów ciepłowniczych na podstawie modeli numerycznych, które umożliwiają przeprowadzenie eksperymentu, również dla nieistniejących jeszcze obiektów. Wyniki symulacji (szczególnie uzyskane z wykorzystaniem metody aproksymacji współczynnika przenikania ciepła k) były zbliżone do wyników badań uzyskanych na węźle badawczym i stanowiły podstawę do opracowania algorytmu sterowania pracą węzłów pierwszostopniowych.
2. Analizy wpływu zmienności strumienia wody cyrkulacyjnej na pracę węzła ciepłowniczego przeprowadzone przy wykorzystaniu programu symulacyjnego pozwoliły na:
 - wykazanie konieczności analizy pracy węzła ciepłowniczego z uwzględnieniem działania instalacji cyrkulacyjnej,
 - określenie zakresu zmienności przepływów wody sieciowej spowodowanego zwiększonym udziałem wody cyrkulacyjnej w strumieniu ciepłej wody użytkowej przy różnych miejscach włączenia instalacji cyrkulacyjnej,
 - określenie wytycznych dotyczących doboru pompy cyrkulacyjnej. Jej przewymiarowanie może powodować wzrost strumienia wody sieciowej w węzłach

ciepłowniczych. W przypadku zastosowania w węzłach ograniczników przepływu powoduje to w rzeczywistości dodatkowe zaniżenie dostawy ciepła do c.o. w stosunku do rzeczywistych potrzeb.

3. Analizy pracy węzłów pierwszostopniowych pozwoliły na:

- porównanie pracy węzłów pierwszostopniowych z typowymi węzłami dwufunkcyjnymi (szeregowo-równoległym i równoległym),
- określenie zakresu zmian przepływów wody sieciowej w węzłach pierwszostopniowych,
- określenie zmienności temperatur wody sieciowej zasilającej wymiennik c.w.u. Obniżona temperatura wody grzewczej przed wymiennikiem ma wpływ na zmniejszenie osadzania kamienia kotłowego na ściankach wymiennika, a tym samym przedłużenie jego żywotności,
- określenie metody obniżenia wymaganego obliczeniowego strumienia wody sieciowej poprzez sterowanie upustem wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o.

4. Badania na obiekcie rzeczywistym (węzeł ciepłowniczy Gliniana 75) pozwoliły na:

- zweryfikowanie podczas badań na obiekcie rzeczywistym wyników symulacji wykonanej w programie symulacyjnym. Badania potwierdzają zachowanie węzłów pierwszostopniowych zgodnie z przewidywaniami z symulacji,
- opracowanie algorytmu sterowania pracą węzła pierwszostopniowego wykorzystującego zmienny przepływ wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. przez wymiennik c.w.u.

5. Węzły pierwszostopniowe mogą stanowić uzupełnienie rodziny węzłów ciepłowniczych. Węzły tego typu są przede wszystkim alternatywą dla stosowanych obecnie węzłów równoległych. Dzięki obniżeniu temperatury wody grzewczej przed wymiennikiem c.w.u. i zmniejszeniu w ten sposób osadzania się kamienia kotłowego na ściankach wymiennika możliwe jest ograniczenie stosowania rozbieralnych wymienników płytowych c.w.u., które w przypadku małych węzłów ciepłowniczych w znaczący sposób zwiększają koszt inwestycyjny węzła. Ze względu na pośredni sposób dostawy ciepła do wymiennika c.w.u. (mieszanie wody grzewczej z sieci ciepłowniczej z wodą sieciową powracającą z wymiennika c.o.) zmniejszone zostają również wahania temperatury c.w.u. (w porównaniu do węzła równoległego) co wpływa zarówno na zwiększenie jakości dostawy c.w.u. jak i zwiększenie żywotności zaworu regulacyjnego ciepłej wody użytkowej (ZR_{CW}) a przede wszystkim jego siłownika. W przypadku węzłów dla domów jednorodzinnych bez instalacji

cyrkulacyjnej zastosowanie węzła pierwszostopniowego nie wymaga specjalnego sterownika. W węzłach pierwszostopniowych dla domów jednorodzinnych i wielorodzinnych z instalacją cyrkulacyjną, przy zastosowaniu w układzie automatycznej regulacji czujnika przepływu umieszczonego na przewodzie wody zimnej, możliwe jest uzyskanie stabilnej pracy układu cyrkulacji bez konieczności otwarcia zaworu ZR_{CW} (układ sterowania analogiczny do kotła dwufunkcyjnego dla domu jednorodzinnego). Należy przy tym zaznaczyć, że w takim przypadku temperatura wody cyrkulacyjnej będzie się zmieniała w sezonie grzewczym zgodnie z temperaturą wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. Jak udowodniono podczas badań, wykorzystując zmienny przepływ wody sieciowej powracającej z wymiennika c.o. możliwe jest zmniejszenie obliczeniowego przepływu wody sieciowej w przypadkach w których nie ma możliwości stosowania pełnego priorytetu c.w.u. W układach węzłów ciepłowniczych umożliwiającym ręczną lub automatyczną zmianę konfiguracji węzła pierwszostopniowego na równoległy możliwe jest wykorzystanie zalet węzła pierwszostopniowego przy niskich temperaturach zewnętrznych oraz redukcja obliczeniowego strumienia wody sieciowej do wartości wymaganej przez pracę węzła równoległego - bez konieczności stosowania dodatkowego zaworu regulacyjnego ZR_{CW2} . Należy jednak zaznaczyć, że takie działanie spowoduje w okresie przejściowym (w którym węzeł pracować będzie jako równoległy) zwiększone wahania temperatury wody sieciowej w porównaniu do węzła pierwszostopniowego.

6. Istnieje możliwość zastosowanie obejścia wymiennika c.w.u. o stałej oporności (poprzez zastosowanie na obejściu np. zaworu regulacyjnego ręcznego). Węzły tego typu nie były przedmiotem przeprowadzonych badań i ocena możliwości zastosowania tego typu węzłów wymaga przeprowadzenia dalszych analiz.

Literatura:

- [1] Polska norma PN-90/B-01421 *Ciepłownictwo – Terminologia*.
- [2] Polska norma PN-90/B-01430 *Ogrzewnictwo – Instalacje centralnego ogrzewania – Terminologia*.
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 30 czerwca 2004 r. *W sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci ciepłowniczych oraz eksploatacji tych sieci*.
- [4] Polska Norma PN-82/B-02403 *Ogrzewnictwo – Temperatuty obliczeniowe zewnętrzne*.
- [5] Wollerstrandt J. *Cyrkulacja ciepłej wody w świetle nowych wymagań*, C.O.W. nr 12 1991r.
- [6] Mańkowski S. – *Projektowanie instalacji ciepłej wody użytkowej*, Arkady Warszawa 1981r.
- [7] Polska norma PN-B-02423 *Węzły ciepłownicze. Wymagania i badania przy odbiorze*.
- [8] Zezula M. – *Wymagania techniczne do projektowania węzłów ciepłych z zakresie mocy cieplnej 30-1500kW* ; Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej Wrocław S.A; Wrocław 2002r.
- [9] Pancewicz A.– *Systemy ciepłownicze w Finlandii*; C.O.W nr1/1998r.
- [10] Szczechowiak E, Świątek B., Wilczak T., *Ciepłownictwo Poradnik – Węzły Ciepłownicze*, Wydanie III, Fundacja Rozwoju Ciepłownictwa “Unia Ciepłownictwa” Warszawa 1997r.
- [11] Wasilewski W., *Uproszczona metoda wymiarowania węzłów równoległych co i cwu, z ogranicznikami strumienia wody sieciowej*, II Forum Ciepłowników Polskich Międzyzdroje1998r.
- [12] Szaflik W., *Analiza pracy równoległego węzła c.o. i c.w.u. z priorytetem przygotowania ciepłej wody*, II Forum Ciepłowników Polskich Międzyzdroje1998r.
- [13] Szaflik W., *Projektowanie jednostopniowych bezzasobnikowych węzłów ciepłej wody użytkowej z priorytetem jej przygotowywania*, XI International Conference Air Conditioning, Procection & District Heating 2005r.
- [14] Fijewski M., *Badania pełnoszeregowego węzła ciepłowniczego okresowo pracującego jako szeregowo-równoległy*. Rozprawa doktorska 2000r.
- [15] Krysiak J., Patent PL. 166667 B1, *Układ węzła ciepłego*.
- [16] Milaniuk M., *Porównanie wybranych wskaźników efektywności wymienników ciepła stosowanych w ciepłownictwie*, Ciepłownictwo w Polsce i na Świecie, nr 1 2003r.
- [17] Wollerstrand J., *Performance test of brazed plate heat exchangers of type Cetepac after 2 years service in a district heating substation in Poland*, Department of Heat and Power Engineering Lund Institute of Technology 1995r.
- [18] Skagestad B., Mildenstein P., *District Heating and Cooling Connection Handbook*, The International Energy Agency 2002r.

Literatura:

- [19] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*. (Dz. U. Nr 75, poz. 690) wraz z naniesionymi zmianami znajdującymi się w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 7 kwietnia 2004 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 109, poz. 1156)
- [20] Zinko H., Hoon L., Bong-Kyun K., Youn-Hong K., Hakan L., Loewen A., Seungkyu H., Walletun H., Wigbels M., *Improvement of Operational Temperature Differences in District Heating Systems*, The International Energy Agency R&D Programme on District Heating and Cooling, 2005r.
- [21] Polska Norma PN-92 B-01706 *Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu*.
- [22] *Ramowe wytyczne projektowania instalacji ciepłej wody w budownictwie mieszkaniowym wielorodzinnym*. Zarządzenie nr 47. Dziennik Budownictwa nr 6, Warszawa 1976r.
- [23] DIN 4708 *Zentrale Wassererwärmungsanlagen in Wohnbauten*
- [24] *Danish Standard for water installations* (DS 439, 3rd edition), June 2000r.
- [25] Jeżowiecki J., Brydak-Jeżowiecka D., Giełda J., Kijak S., Tiukało A., Zaleski J. *Instrukcja projektowania pompowych układów cyrkulacyjnych w instalacjach c.w.u.* Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej, Raport SPR-21/84 Wrocław 1984r.
- [26] Fredriksen S., Nikolic D., Wollerstrand J., *District heating house stations for optimal operation*. 25th UNICHAL-Congres / VIII IDHC Budapest 1991r.
- [27] Nowakowski E., *Rozwiązanie cyrkulacji w instalacjach ciepłej wody*. Rynek Instalacyjny nr 3/2006r.
- [28] Brinkmann L., Dyrelund A. *District Heating – a perfect heat source for hot tap water*. Danish Board of District Heating 2/2002r.
- [29] Śnieżyk R. – *Analiza pracy ciepłowni*. Praca niepublikowana 2002r
- [30] Mielnicki J.S. – *Centralne ogrzewanie regulacja i eksploatacja*, Arkady, Warszawa 1985r., Wydanie 2.
- [31] *Wymienniki ciepła typu JAD*, Wytwórnia Urządzeń Instalacji Przemysłowych Termowent
- [32] Cooper A., Usher J. D. – *Plate Heat Exchangers, Section 3.7 of Heat Exchanger Design Handbook*, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1983r.
- [33] Zaleski T., Klepacka K. – *Atlas obliczeń płytowych wymienników ciepła*, PAN Instytut Inżynierii Chemicznej, Gliwice 1993r.
- [34] Madejski J. i inni – *Teoria wymiany ciepła*, Szczecin 1998r.
- [35] Kowalenko L.M. – *Issledowanie processa konwektywnogo tieploobmienu w izwilistnykh szczelewych kanałach*, Tieploenrgietika, 1962r.
- [36] Nowak W. – *Teoria rekuperatorów*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1993r.

Literatura:

- [37] Pitts D., Sissom L. – *Heat transfer second edition*, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS Schaum's Outlines Series 1999r.
- [38] Koczyk H., Radziszewski M., Wilczak T. – *Uproszczona metoda obliczeń cieplnych przeciwprądowych wymienników ciepła i ich układów*, COW nr 4/5 1984r.
- [39] Gluck B., *Zustands und Stoffwerte, Verbrennungd-Rechnung*; Verlag fur Bauwesen, Berlin 1986
- [40] Halvorson M., *Microsoft Visual Basic 6.0 Profesjonal krok po kroku*, Microsoft Press, Edycja polska: R.M Sp. z o.o, Warszawa 1998r.
- [41] Sedgewick R., *Algorithms*, Brown University, Addison-Wesley Publishing Company, USA 1984
- [42] Klimczak M., Napiórkowski R., *Projekt techniczny modernizacji węzła cieplnego przy ulicy Gliniana 75*, Wrocław 2003r.
- [43] Senczyk D., *Podstawy teorii pomiarów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003r.
- [44] Mulas E., Rumianowski R., *Rachunek niepewności pomiaru w pracowni fizycznej. Nowa kodyfikacja*, Wydanie drugie poprawione Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004r.
- [45] Arendarski J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003r.
- [46] Karta katalogowa D-12-45, EGWS, EGX2 Water temperature sensor, thermistor, TAC 1999r.
- [47] Karta katalogowa D-12-10, EGU czujnik temperatury zewnętrznej, TAC 1995r.
- [48] Karta kalibracji przepływomierza Promag 50W DN25, Endress+Hauser 2004r.
- [49] Karta katalogowa Multical® Energy meter, Kamstrup A/S
- [50] Polska Norma PN-EN 1434-I:2001, *Ciepłomierze. Część I: Wymagania ogólne*.