

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Małgorzata Kwestarz

WARSZAWA
2011

**Analiza wpływu
zasobnika ciepła na parametry
pracy sieci ciepłowniczej**

694.3 : | 658.4 : 620.9 | : 004.94 : 519.86 :
043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Inżynierii Środowiska

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Małgorzata Kwestarz

**Analiza wpływu zasobnika ciepła na parametry pracy
sieci ciepłowniczej**

Promotor

Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej J. Osiadacz

Warszawa, 2011r.

L 57

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Inżynierii Środowiska

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Andrzej Kowalczyk

Analiza wpływu warunków eksploatacji na parametry pracy

urządzeń ciepłowniczych



Praca

Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej J. Ostrowski

Warszawa, 2011 r.

3GMD/253-01

Streszczenie

W niniejszym rozprawie dokonano próby wyliczenia wpływu temperatury na procesy chemiczne i fizyczne, które mają miejsce w czasie trwania reakcji. Wyniki tych obliczeń zostały przedstawione w formie wykresów i tabel.

Wielkość wpływu temperatury na szybkość reakcji chemicznych i fizycznych została wyliczona za pomocą równania Arrheniusa. Wyniki tych obliczeń zostały przedstawione w formie wykresów i tabel.

Wyniki obliczeń wykazały, że wpływ temperatury na szybkość reakcji chemicznych i fizycznych jest bardzo istotny. Wyniki te zostały przedstawione w formie wykresów i tabel.

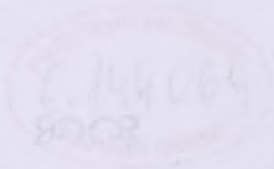
W niniejszym rozprawie dokonano próby wyliczenia wpływu temperatury na procesy chemiczne i fizyczne, które mają miejsce w czasie trwania reakcji. Wyniki tych obliczeń zostały przedstawione w formie wykresów i tabel.



Dziękuję Promotorowi

*Panu Prof. zw. dr hab. inż. Andrzejowi J. Osładaczowi
za poświęcony czas, podzielenie się wiedzą,
ważne wskazówki i korekty,
które mnie motywowały i ułatwiły mi napisanie pracy.*





Handwritten text, possibly a name or title, located to the right of the stamp.

Handwritten text, possibly a date or location, located below the stamp.

Handwritten text, possibly a signature or initials, located at the bottom center of the page.

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy analizy hydraulicznej sieci ciepłowniczej. Głównym jej celem jest określenie wpływu zasobnika ciepła na parametry pracy sieci ciepłowniczej.

Sieć ciepłownicza i zasobnik ciepła zostały opisane zależnościami matematycznymi. Stworzono model matematyczny odwzorowujący pracę rzeczywistej sieci ciepłowniczej. Przeprowadzono szereg obliczeń symulacyjnych pracy sieci dla różnych parametrów: pracy źródła ciepła, wielkości odbiorów ciepła oraz lokalizacji zasobników ciepła.

Wyniki symulacji wskazują, że zasobniki ciepła mają istotny wpływ, na jakość pracy systemu ciepłowniczego. Redukują czas opóźnienia transportowego pomiędzy źródłem ciepła a odbiorcą, minimalizują straty ciepła w procesie dystrybucji.

Poprawność wyników otrzymanych na podstawie obliczeń symulacyjnych została potwierdzona poprzez porównanie z danymi pomiarowymi pochodzącymi z rzeczywistego systemu ciepłowniczego.

Per aspera ad astra...
Verba volant, scripta manent.

Abstract

My Ph D thesis is concerned with hydraulic analysis of district heating system. Main problem is to determine role of thermal energy storages in the system and their influence on parameters of work of heating systems.

Mathematical model of thermal energy storage has been formulated. The heating network has been described by set of non linear algebraic equations. By analysis of work of real networks, conditions for computer simulation have been defined. Computer simulation for differ parameters of supply, loading and different location of the TES of the network have been carried out. Results of simulation have shown that thermal energy storages plays very important role in the quality of exploitation of district heating network work. They cut down a factor time of heat delay transport between an energy source and an end user and minimised losses of thermal energy during process of transportation.

Correctness of the mathematical model of the heating network has been verified using real input data.

*Through hardships to the stars...
Spoken words fly away, written words remain.*

Spis treści

1. Teza i zakres pracy	8
1.1. Wprowadzenie i zakres pracy	8
1.2. Teza.....	10
2. Ogólna charakterystyka systemu ciepłowniczego.....	11
2.2. Systemy ciepłownicze w Polsce - historia	22
3. Zasobnik ciepła	24
3.1. Klasyfikacja zasobników ciepła.....	24
3.2. Zasobniki pary - rys historyczny	24
3.3. Zasobniki wodne.....	28
3.4. Rys historyczny – przykłady instalacji	33
3.5 Stratyfikacja temperatury w zasobniku ciepła	42
4. Obiegi wodne w źródłach ciepła.....	47
4.1. Współpraca z zasobnikiem ciepła.....	51
4.2. Regulacja pracy sieci ciepłowniczey	56
4.3 Akumulacja ciepła w sieci ciepłowniczey	67
4.4 Praca zasobnika ciepła	71
5. Pojemność centralnego zasobnika ciepła	73
5.1. Metoda wyznaczania pojemności centralnego zasobnika ciepła.....	73
5.2. Studium przypadku	77
6. Modelowanie sieci ciepłowniczey	81
6.1 Modelowanie systemu ciepłowniczego	81
6.2. Przepływ masy w systemie ciepłowniczym.....	92
6.3 Straty ciepła sieci ciepłowniczey.....	98
6.4 Transport energii w sieci ciepłowniczey	103
7 Symulacja komputerowa sieci ciepłowniczey.....	111
7.1 Weryfikacja modelu na zbiorze danych rzeczywistych.....	111
7.2 Scenariusze symulacji pracy systemu ciepłowniczego.....	116
7.3 Omówienie wyników obliczeń symulacyjnych	127
8 Podumowanie.....	111
Bibliografia	137
Spis rysunków.....	140
Spis tabel	147

1. Teza i zakres pracy

1.1. Wprowadzenie i zakres pracy

Tematem pracy jest *Analiza wpływu bezciśnieniowych, wodnych zasobników ciepła na parametry pracy sieci ciepłowniczych oraz ustalanie ich lokalizacji w strukturze sieci.*

Zasobnik ciepła nazywany popularnie akumulatorem w pracy został przedstawiony jako element sieci ciepłowniczej. Udowodniono, że w dobie gospodarki rynkowej, gdzie ciepło i energia elektryczna są towarami, montaż i eksploatacja zasobników ciepła jest konieczna z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Zakres inwestycji, jakim jest budowa zasobników ciepła jest odpowiedzią na dwa pytania: jakiej wielkości czyli pojemności cieplnej powinien być zasobnik bądź grupa zasobników oraz w którym miejscu powinny być włączone do sieci ciepłowniczej.

Wyznaczanie pojemności zasobnika obejmuje trzy przypadki:

W pierwszym przypadku zakłada się dobór zasobnika o pojemności cieplnej pozwalającej na pracę ciągłą źródła w okresie letnim z mocą odpowiadającą średniemu zapotrzebowaniu mocy na cele: ciepłej wody użytkowej (CWU) i ciepła technologicznego (CT) w skali doby, tzw. zasobnik o pełnej akumulacyjności. Pozwala to na zainstalowanie w źródle urządzeń wytwórczych o mniejszej mocy od mocy maksymalnej - szczytowej jak ma to miejsce w przypadku systemów niewyposażonych w zasobniki. Efektem są mniejsze koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne wynikające z możliwości pracy źródła ze wysoką sprawnością.

Drugi przypadek, który dotyczy systemów zasilanych z układów kogeneracyjnych uwzględnia wpływ struktury taryf dla energii elektrycznej, na czas pracy układu skojarzonego. Istotną rolę odgrywa podział na grupy taryfowe, grupy przyłączeniowe oraz strefy czasowe rozliczeń. W funkcji tych trzech składników lokalne przedsiębiorstwo energetyczne ustala ceny zakupu energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej. Zazwyczaj wyróżnia się trzy strefy czasowe tj. szczyt przedpołudniowy i szczyt popołudniowy z największymi cenami jednostkowymi zakupu energii elektrycznej oraz tzw. pozostałe godziny z ceną jednostkową minimalną. Maksymalizując zysk z produkcji energii elektrycznej w godzinach szczytu źródło pracuje z mocą maksymalną. W pozostałych godzinach układ produkcji skojarzonej obciążony jest mocą minimalną, która zapewnia możliwość rozładowania zasobnika.

W przypadku trzecim zakłada się wyłączenie z pracy układu kogeneracyjnego na czas trwania weekendu i dni świątecznych. Wówczas ciepło do sieci dostarczane jest z zasobnika naładowanego w dni robocze. Przerwa w pracy źródła ma na celu obniżenie kosztów eksploatacji np. poprzez rezygnację z jednej zmiany obsługującej urządzenia, ale także zrezygnowanie z produkcji energii elektrycznej w okresie najniższych cen sprzedaży.

Bardzo istotnym problemem jest: ustalanie lokalizacji zasobników w strukturze sieci ciepłowniczej. Zasobniki ciepła w Europie budowane są w bezpośrednim sąsiedztwie źródła. Wzorem tych rozwiązań w Polsce zasobniki są lokalizowane bezpośrednio w sąsiedztwie elektrociepłowni, a w związku z tym zasobnik jest traktowany jak element źródła ciepła a nie sieci ciepłowniczej.

W pracy wykazano, że zasobniki ciepła mogą zostać rozproszone w obszarze sieci ciepłowniczej. Każdy z nich pracuje w godzinach maksymalnego zapotrzebowania na ciepło jako lokalne źródło ciepła a w czasie minimalnych rozbiorów ciepła jako dodatkowy odbiornik ciepła. Wielkość zasobnika odpowiada omówionemu powyżej zasobnikowi o pełnej akumulacyjności. Oznacza to, że dostarczając ciepło do najbliższych usytuowanych węzłów ciepłowniczych względem siebie uśrednia zużycie ciepła w przyjętym okresie czasu - zazwyczaj doby. Wybór rejonów współpracy zasobnika z odbiorcami ciepła wiąże się z podziałem sieci ciepłowniczej na podsystemy, które będą zasilane ciepłem na stałym średnim poziomie w ciągu doby. Zatem sieć przesyłowa – magistralna będzie pracować ze stałym obciążeniem, co oznacza stały przepływ i minimalne wahania temperatury zasilania i powrotu zasilając podsystemy. Przepływ jak i temperatury będą zmieniać się w skali roku z uwzględnieniem okresu letniego, zimowego jak i obu okresów przejściowych, gdy system ciepłowniczy rozpoczyna bądź kończy zasilanie wymienników centralnego ogrzewania w węzłach u odbiorców. Tak skonfigurowana sieć stabilizuje temperaturę wody powrotnej do źródła na najniższym poziomie przy zachowaniu stałego przepływu czynnika.

Zasobniki ciepła zlokalizowane przy źródłach są popularnymi elementami obiegów hydraulicznych w Danii, Szwecji, Norwegii, Wielkiej Brytanii. Przykładowo w Danii szacuje się, że ok. 1000 sztuk jest eksploatowanych w systemach ciepłowniczych. Dla porównania w Polsce eksploatowane są dwa : w EC Siekierki – największy w skali kraju $30\,400\text{m}^3$ i EC Siedlce 800m^3 ; dwa są w budowie : Kraków – $20\,000\text{m}^3$ i Białystok – $2\,800\text{m}^3$ oraz jeden jest projektowany w Bielsku-Białej.

Brak jest doświadczeń w zakresie rozproszonych zasobników ciepła. W literaturze często spotykane zasobniki ciepła są elementem obiegów hydraulicznych instalacji solarnych i obiegów hydraulicznych źródeł spalających biomasę.

1.2. Teza

W pracy przyjęto tezę, że zasobnik ciepła jest niezbędnym elementem nowoczesnej sieci ciepłowniczej, jego eksploatacja podwyższa efektywność pracy sieci ciepłowniczej poprzez zmniejszenie czasu opóźnienia transportowego i strat ciepła w procesie dystrybucji.

Opóźnienie transportowe jest to czas, w jakim ciepło transportowane przez czynnik, czyli gorącą wodę dopłyne od źródła ciepła do węzła ciepłowniczego, czyli odbiorcy końcowego. Dla każdego z węzłów ciepłowniczych jest to wartość zmienna w skali roku kalendarzowego. Jest wynikiem zmiennych prędkości wody w poszczególnych odcinkach sieci w efekcie sterowania pracą sieci. Szczegółowo zagadnienie to zostało omówione w rozdziale 4 niniejszej pracy.

Straty ciepła w procesie dystrybucji W pracy przeprowadzono analizę porównując straty mocy odniesione do mocy źródła ciepła. Obliczenia symulacyjne wykonywano w oparciu o statyczny symulator sieci ciepłowniczej.

2. Ogólna charakterystyka systemu ciepłowniczego

System ciepłowniczy to zespół urządzeń służący wytwarzaniu, przesyłaniu i dystrybucji energii cieplnej pomiędzy źródłem ciepła a odbiorcami. Można wydzielić trzy grupy elementów i urządzeń tj. źródła ciepła, sieci ciepłownicze oraz węzły ciepłownicze. Definicje poszczególnych elementów systemu podaje Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych [44]:

Sieć ciepłownicza – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje, służące do przesyłania i dystrybucji ciepła ze źródeł ciepła do węzłów cieplnych;

Źródło ciepła – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje służące do wytwarzania ciepła;

Węzeł cieplny – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje służące do zmiany rodzaju lub parametrów nośnika ciepła dostarczanego z przyłącza oraz regulacji ilości ciepła dostarczanego do instalacji odbiorczych;

Przyłącze – odcinek sieci ciepłowniczej doprowadzający ciepło wyłącznie do jednego węzła cieplnego.

Na rys. 2.1 przedstawiono schemat poglądowy systemu ciepłowniczego.



Rysunek 2.1 System ciepłowniczy – schemat poglądowy [47]

Figure 2.1 Scheme of the heating system

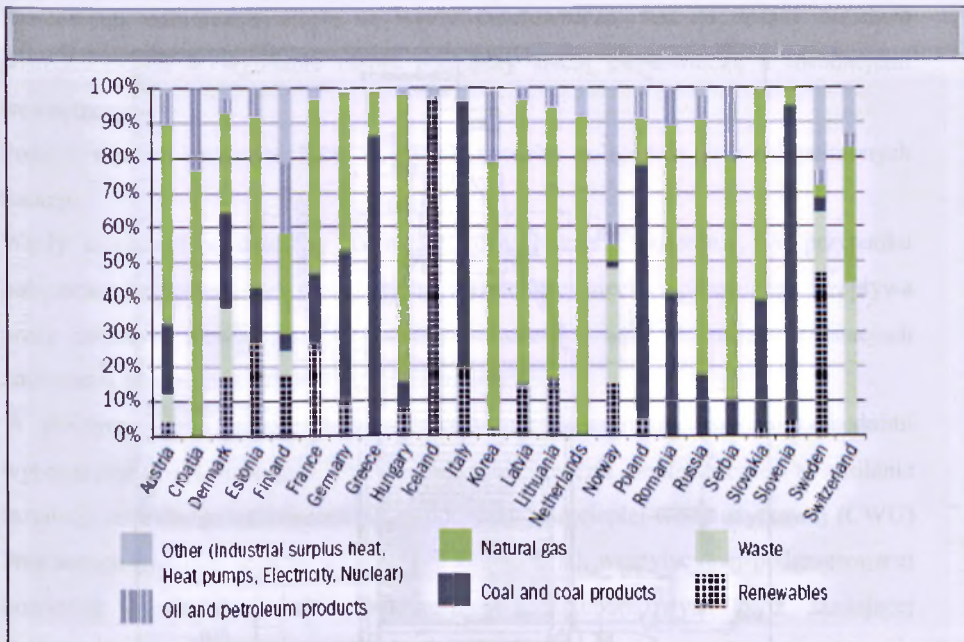
Wymienione powyżej grupy urządzeń i elementów tworzą system ciepłowniczy. Rozporządzenie definiuje podmioty gospodarcze, które odpowiadają za sprawne działanie całości bądź poszczególnych elementów systemu ciepłowniczego. Przedsiębiorstwo ciepłownicze [44] to przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się wytwarzaniem ciepła w eksploatowanych przez to przedsiębiorstwo źródłach ciepła, przesyłaniem i dystrybucją oraz sprzedażą ciepła wytworzonego w tych źródłach lub zakupionego od innego przedsiębiorstwa energetycznego. Nieco bardziej okrojona działalność prowadzą przedsiębiorstwa energetyczne określane mianem: wytwórcza ciepła, dystrybutor ciepła oraz przedsiębiorstwo obrotu ciepłem. To ostatnie jest przedsiębiorstwem energetycznym zajmującym się wyłącznie handlem ciepłem.

Z perspektywy zagadnień poruszanych w rozprawie definicji wymaga określenie dyspozytor (operator) sieci ciepłowniczej. Dyspozytor sieci ciepłowniczej oznacza upoważnioną przez przedsiębiorstwo ciepłownicze lub dystrybutora ciepła jednostkę organizacyjną, która jest odpowiedzialna za sterowanie pracą sieci ciepłowniczej.

System ciepłowniczy posiada jedno bądź kilka źródeł ciepła. Technologia wytwarzania ciepła w źródłach jest bardzo zróżnicowana. Zależy od rodzaju paliwa, metody konwersji energii z paliwa, wyboru nośnika ciepła. Czynnikiem transportującym ciepło w sieci ciepłowniczej najczęściej jest woda.

Ciepło wytwarzane jest na drodze różnych procesów: spalania węgla, gazu, oleju, biomasy, przetwarzania energii słonecznej, odzyskiwania ciepła wód geotermalnych i wykorzystanie energii elektrycznej.

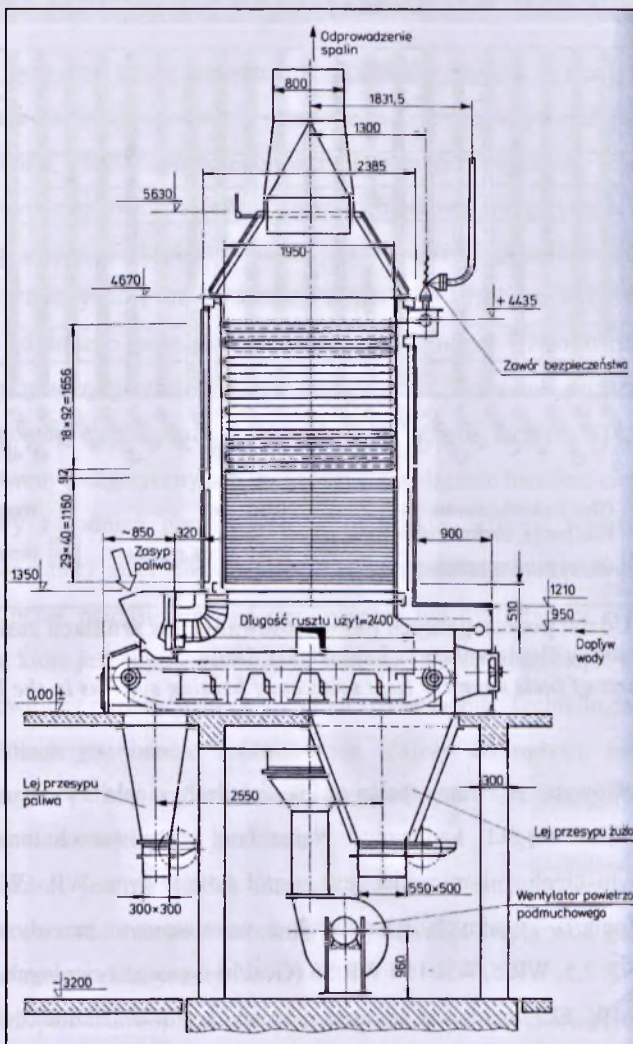
Na rysunku 2.2 przedstawiono udział poszczególnych paliw stosowanych w źródłach ciepła w krajach unii Europejskiej [40].



Rysunek 2.2 Udział poszczególnych paliw stosowanych w źródłach zasilających systemy ciepłownicze w krajach UE [40]

Figure 2.2 Parts of fuels supplied heat sources of heating systems in the EU countries

Polsce podstawowym paliwem spalonym w źródłach ciepła zasilających systemy ciepłownicze jest węgiel kamienny. Najbardziej rozpowszechnionym układem technologicznym ciepłowni miejskiej jest zespół kotłów typu WR (WLM - kocioł wodny La Monta:) – wodnych, rusztowych z wymuszonym przepływem wody w typoszeregu WR 2,5, WR 5, WR 10 i WR 25 (Gcal/h) o mocach cieplnych odpowiednio od 2,9 do 32 MW. Eksploatowane są także jednostki kotłowe narzutnikowe co oznacza system podawania paliwa dosłownie narzucania na ruszt kotła oznaczona symbolem N: WR 2,5N, WR 4,2N, WR 5N, WR 8N, WR 10N, WR 15N, WR 17N, WR 25N [6]. Na rys. 2.3 przedstawiono przekrój kotła WR-25 z zaznaczonymi sekcjami urządzeń: nawęglania, doprowadzenia powietrza podmuchowego, doprowadzenia wody, odprowadzenia spalin, usuwania żużla.



Rysunek 2.3 Schemat kotła WR-25 [6]

Figure 2.3 Scheme of the WR-25 boiler

Kotły pracujące w źródle ciepła są równolegle zasilane przez system obiegów wodnych. Wyposażone są w mechaniczny system nawęglania i usuwania odpadów paleniskowych, czyli żużla. Każdy z kotłów wyposażony jest w indywidualny system oczyszczania spalin bądź centralny wspólny dla wszystkich jednostek kotłowych. Ze spalin eliminowany jest pył, tlenki siarki i azotu.

Końcowymi odbiorcami ciepła są **węzły ciepłownicze**. Jest to zespół urządzeń pośredniczących w wymianie ciepła pomiędzy siecią ciepłowniczą a instalacjami wewnętrznymi.

Podział węzłów ciepłowniczych zależy od sposobu połączenia oraz od pełnionych funkcji.

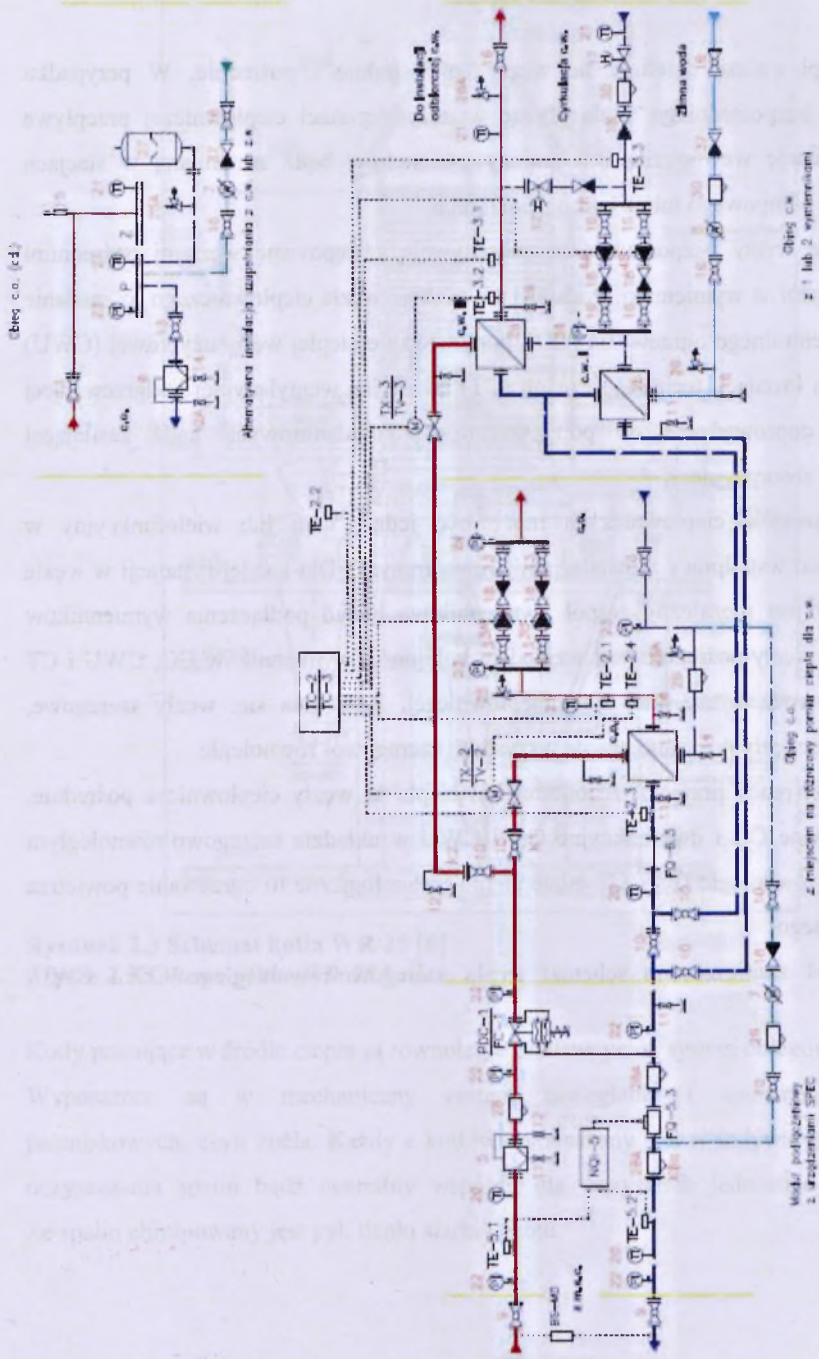
Węzły ciepłownicze dzielimy na węzły bezpośrednie i pośrednie. W przypadku połączenia bezpośredniego woda płynąc w miejskiej sieci ciepłowniczej przepływa przez instalację wewnętrzną bez zmiany parametrów bądź ze zmianą w stacjach zmieszania pompowego lub w hydroelewatorach.

W praktyce węzły bezpośrednie są sukcesywnie zastępowane węzłami pośrednimi wyposażonymi w wymienniki. Podstawowe funkcje węzła ciepłowniczego to zasilanie instalacji centralnego ogrzewania (CO), podgrzewanie ciepłej wody użytkowej (CWU) oraz innych instalacji technologicznych (CT) takich jak wentylacyjnej podgrzewającej powietrze doprowadzane do pomieszczeń wielokubaturowych bądź zasilającej chłodziarki absorpcyjne.

Każdy z węzłów ciepłowniczych może być jedno, dwu lub wielofunkcyjny w zależności od współpracy z instalacjami wewnętrznymi. Dla każdej instalacji w węzle montowany jest niezależny zespół wymienników. Układ podłączenia wymienników klasyfikuje węzły pośrednie pod względem kolejności wymienników CO, CWU i CT zasilanych wodą z miejskiej sieci ciepłowniczej. Rozróżnia się: węzły szeregowe, równoległe i węzły mieszane przede wszystkim szeregowo-równoległe.

W niniejszej pracy przyjęto, że odbiorcami ciepła są węzły ciepłownicze pośrednie, jednofunkcyjne CO i dwufunkcyjne CO i CWU w układzie szeregowo-równoległym oraz węzły równoległe CO i CT gdzie ciepło technologiczne to ogrzewanie powietrza wentylacyjnego.

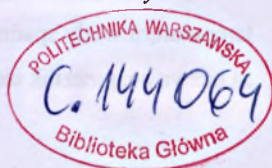
Na rys. 2.4 zamieszczono schemat węzła szeregowo-równoległego CO i CWU.



Rysunek 2.4 Schemat węzła dwufunkcyjnego w układzie szerego-równoległym [46]
 Figure 2.4 Scheme of double functional heat exchange unit in *seriate - parallel configuration*

Legenda - Specyfikacja podstawowych urządzeń i elementów węzła ciepłowniczego:

1. Wymiennik ciepła c.o.
- 2a, 2b. Wymienniki ciepła c.w. stopni: II i I
- 3A, 3B. Pompy obiegowe c.o.
- 4A. Pompa cyrkulacyjna c.w.
5. Odmulacz sieciowy
8. Wodomierz instalacji wodociągowej
9. Zawór lub kurek odcinający sieciowy przyłącza sieci ciepłej
10. Zawór lub kurek odcinający sieciowy
11. Zawór lub kurek spustowy sieciowy
12. Zawór lub kurek odpowietrzający sieciowy
13. Zawór lub kurek odcinający instalacyjny c.o. (c.t.)
14. Zawór lub kurek spustowy instalacyjny c.o.
16. Zawór lub kurek odcinający instalacyjny c.w., z.w.
17. Zawór lub kurek regulacyjny ręczny
18. Zawór zwrotny
19. Zawór lub kurek spustowy instalacyjny c.w.
20. Termometr sieciowy
21. Termometr instalacyjny
22. Manometr sieciowy
23. Manometr instalacyjny
24. Manometr kontaktowy (zabezp. przed suchobiegiem pomp)
25. (25A) Zawór bezpieczeństwa instalacyjny c.o. (c.t.)
26. (26A) Zawór bezpieczeństwa instalacyjny c.w.
28. Filtr siatkowy sieciowy 400 oczek/cm²
- 28A. Filtr siatkowy sieciowy 200 oczek/cm²
29. Filtr siatkowy c.o. (c.t.) 400 oczek/cm²
30. Filtr magnetyczny c.w.
35. Zasobnik ciepła c.w.
- 42A. Pompa ładująca
- KDo** Kryza dławiąca w module podłączeniowym
- K1** Kryza dławiąca w gałęzi c.o.
- PDC-1/FC-1** Regulator różnicy ciśnień i przepływu modułu podłączeniowego
- TC-2** Sterownik lub regulator elektroniczny w obiegu c.o.
- TX-2/TV-2** Zawór regulacyjny c.o. z silownikiem
- TE-2.1** Czujnik temperatury wody instalacyjnej c.o. – zanurz./przyłg.
- TE-2.2** Czujnik temperatury zewnętrznej obwodu c.o.
- TE-2.3** Czujnik temp. wody sieciowej powrotnej z wymiennika c.o. – zan./przyłg.
- TE-2.4** Ogranicznik STW – zanurz./przyłg.
- TC-3** Sterownik lub regulator w obiegu c.w.
- TX-3/TV-3** Zawór regulacyjny c.w. z silownikiem
- TE-3.1** Czujnik temperatury ciepłej wody użytkowej - zanurzeniowy
- TE-3.2** Bezpiecznik STB – zanurzeniowy
- TE-3.3** Czujnik temperatury wody powrotnej z cyrkulacji c.w. - zanurzeniowy
- TE-3.4** Czujnik temperatury c.w. w górnej części zasobnika – zanurzeniowy
- TE-3.5** Czujnik temperatury c.w. w dolnej części zasobnika - zanurzeniowy
- NQI-5** Przelicznik wskazujący głównego ciepłomierza
- TE-5.1** Czujnik temperatury wody sieciowej zasilającej
- TE-5.2** Czujnik temperatury wody sieciowej powrotnej
- FQ-5.3** Przetwornik przepływu głównego ciepłomierza



Węzeł tworzą: jeden zespół wymienników CO oraz dwa zespoły wymienników CWU oznaczonych „stopień I” i „stopień II” tworząc układ szeregowo-równoległy. Taki układ powoduje największe schłodzenie strumienia wody miejskiej sieci ciepłowniczej w porównaniu w układem wymienników w węźle szeregowym bądź równoległym przy zachowaniu wymaganych poziomów temperatury wody zasilającej instalację wewnętrzną centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Węzeł ciepłowniczy niezależnie od schematu technologicznego wyposażony jest w następujące elementy automatycznej regulacji:

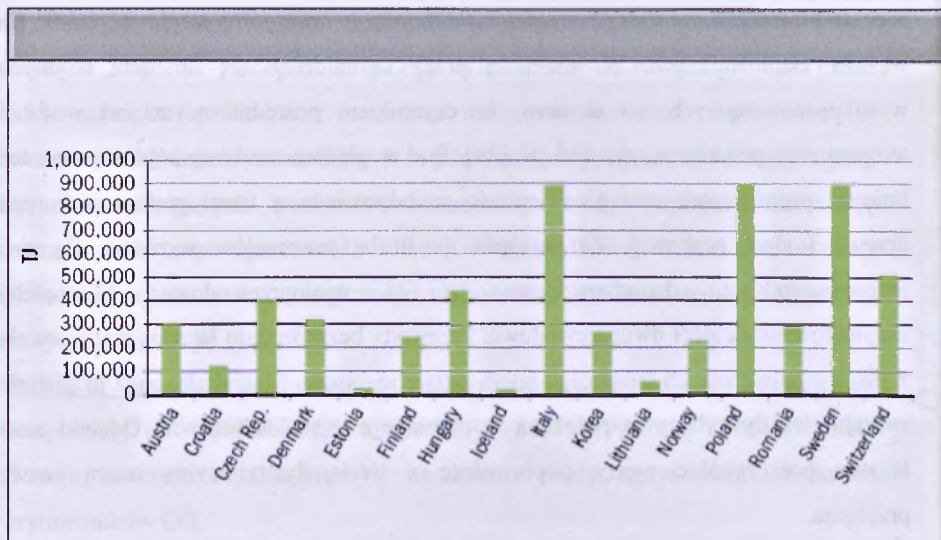
- Regulator pogodowy – pracuje w funkcji pomiaru temperatury zewnętrznej, temperatury wewnątrz obiektu i temperatury wody wpływającej do wymiennika. Steruje zaworem regulacyjnym tj. strumienia wody wpływającej do baterii wymienników CO,
 - Regulator $\Delta p/ V$ [46] stosuje się regulatory z osobnymi, niezależnymi członami regulacji różnicy ciśnienia i przepływu (siłownik z dwoma membranami roboczymi) sterującymi zaworem regulacyjnym. Zawory montowane są na przewodzie zasilającym węzeł ciepłowniczy. W węzłach małej mocy, dla MSC w Warszawie poniżej 75kW dopuszcza się stosowanie uproszczonej wersji regulatora (siłownik z jedną membraną roboczą). Montaż odbywa się wówczas na rurociągu wody powrotnej. Prawidłowa nastawa regulatora jest funkcją poniższych danych:
 - maksymalnej i minimalnej dyspozycyjnej różnicy ciśnienia, jaka występuje w danym rejonie zasilania,
 - dyspozycyjnej różnicy ciśnienia, jaka najczęściej występuje w danym rejonie zasilania,
 - minimalnego ciśnienia zasilania, jakie występuje w danym rejonie zasilania.Dane te są niezbędne do określenia warunków pracy regulatora bez występowania hałasu i zjawisk kawitacyjnych.
- oraz
- STB bądź STW – zawór automatycznie zamykający przepływ wody do instalacji gdy temperatura wody po stronie wody instalacyjnej przekroczy dopuszczalną wartość. Regulator STB wymaga ponownego włączenia przez obsługę bezpośrednio w węźle ciepłowniczym, regulator STW otworzy się automatycznie gdy temperatura wody spadnie poniżej wartości maksymalnej dopuszczalnej. Określane są nazwą bezpiecznik temperaturowy.

Sieć ciepłownicza to zespół urządzeń służących do transportu ciepła od źródła do węzłów ciepłowniczych. W niniejszej pracy ograniczono się do sieci wodnych wysokoparametrowych, co oznacza, że czynnikiem pośredniczącym jest woda o temperaturze przekraczającej 115 °C [29]. Pod względem struktury wyróżniamy sieć liniową, promieniową oraz pierścieniową co odpowiada w teorii grafów sieci typu drzewo i sieci oczkowe. Ze względu na liczbę przewodów wyróżnia się sieć jedнопrzewodową, dwuprzewodową, trój i wieloprzewodową. Najczęściej eksploatowane są sieci dwuprzewodowe. Przewody bezpośrednio łączące źródło ciepła z siecią o największych średnicach noszą nazwę magistral. Magistrala, bądź magistrale zasilają sieć dystrybucyjną położoną w obszarze o gęstej zabudowie. Odcinki sieci łączące poszczególne węzły ciepłownicze z siecią dystrybucyjną noszą nazwę przyłącza.

Ze względu na trasę przebiegu sieci ciepłej rozróżnia się: sieć naziemną i podziemną. Przechodząc do szczegółów konstrukcyjnych sieć naziemna może przebiegać na podporach bezpośrednio ułożonych na powierzchni terenu bądź być podwieszona do estakady nad przeszkodą drogową bądź wodną. Z kolei sieć podziemna może być ułożona w betonowym kanale prefabrykowanym na podporach bądź bezpośrednio na podsypce w gruncie w przypadku sieci preizolowanej. Praktycznie w każdym systemie ciepłowniczym występują wszystkie wymienione technologie montażu przewodów.

Na rys. 2.5 przedstawiono całkowite zapotrzebowanie na ciepło dostarczane przez systemy ciepłownicze w krajach Unii Europejskiej [40].

Doświadczenia europejskie w zakresie eksploatacji systemów ciepłowniczych są znacznie zróżnicowane. W Islandii 95 % ciepła pochodzi z systemów ciepłowniczych, na Łotwie 70%, w Polsce 52 %, w Szwecji 50%, Finlandii 49%, w Danii 48% na Słowacji 42%, w Estonii 40%. W pozostałych krajach nie przekracza kilkunastu procent [30].



Rysunek 2.5 Całkowite zapotrzebowanie na ciepło dostarczane przez systemy ciepłownicze [40]

Figure 2.5 Total heat demand delivered by heating systems

Polski rynek ciepła może być porównywalny pod względem wielkości zapotrzebowania z rynkami Włoch i Szwecji.

W tabeli 2.1 przedstawiono dane systemów ciepłowniczych eksploatowanych w wybranych krajach UE oraz dla porównania skali w Rosji, Chinach, Korei i Japonii [41]. W tabeli zaznaczono kolorem szarym państwa europejskie, które charakteryzują się dużą liczbą istniejących systemów ciepłowniczych lub całkowitą długością sieci albo sumaryczną mocą zainstalowaną. Największą ilością systemów może poszczycić się Republika Czeska, chociaż z uwagi na brak danych ujętych w statystyce Niemcy mogą zajmować pierwsze miejsce wśród państw Europy. Ponad 400 systemów ciepłowniczych jest eksploatowanych także w Danii i Francji; ale moc zainstalowana w ich źródłach nie przekracza 18 000 MWth. Pod tym względem porównywalne z polskimi są systemy niemieckie gdzie moc kształtuje się na poziomie 57 000 MWth a w Polsce 62 752 MWth. Analizując te kryterium na uwagę zasługuje Rumunia gdzie moc zainstalowana sięga 53 200 MWth z liczbą systemów na poziomie 104.

Trzecie kryterium to łączna długość sieci [km]. Niekwestionowanym liderem są Niemcy 100 000 km. Polska z sieciami o długości 18 834 km może porównywać się ze Szwecją 17 782 km i Finlandią 11 000km.

Tabela 2.1 Dane eksploatowanych systemów ciepłowniczych w wybranych krajach Unii Europejskiej, Rosji, Chinach, Korei i Japonii [41]

Table 2.1 Data of heating systems in certain countries of European Union, Russia, China, Korea and Japan

Charakterystyka	Austria	Chorwacja	Republika Czeska	Dania	Estonia	Finlandia	Francja	Grecja	Holandia	Islandia	Litwa	Lotwa	Niemcy
Liczba systemów ciepłowniczych	508	9	655	450	brak danych	150	412	5	17	22	40	32	b.d.
Łączna moc zainstalowana [MW _{th}]	7 500	1 800	36 070	17 266	2 760	20 390	17 442	445	5 325	2 012	b.d.	8 263	57 000
Długość sieci [km]	3 968	460	6 500	27 575	1 420	11 000	3 131	658	3 430	6 738	2 000	2 458	100 000

Charakterystyka	Norwegia	Polska	Rumunia	Serbia	Słowenia	Szwajcaria	Szwecja	Węgry	Włochy	Rosja	Chiny	Korea	Japonia
Liczba systemów ciepłowniczych	55	540	104	57	48	42	140	92	79	17 183	b.d.	26	86
Łączna moc zainstalowana [MW _{th}]	1 400	62 752	53 200	6 000	22 411	1 900	b.d.	9 722	5 129	b.d.	224 660	13 250	4 430
Długość sieci [km]	900	18 834	7 611	1 900	678	890	17 782	3 500	2 171	176 512	88 870	4 665	710

2.2. Systemy ciepłownicze w Polsce - historia

Pierwsze dwa centralne systemy zasilające w ogrzewanie kilka budynków z jednego źródła powstały na przełomie wieków w kompleksie budynków obecnej Politechniki Warszawskiej (1899-1901) i w Szpitalu Dzieciątka Jezus (1897-1901) [35]. Na terenie uczelni początkowo ogrzewano 4 budynki dydaktyczne i 2 mieszkalne zasilając parą bezpośrednio grzejniki. Koszt budowy wyniósł 3,5 mln. rubli (w tym koszt placu 1 mln. rubli). System grzewczy poza zasilaniem parowym instalacji centralnego ogrzewania oparto także na ogrzewaniu ciepłym powietrzem szczególnie budynków dydaktycznych. Projektantem był inż. Kazimierz Obrębowicz (1853-1913) Prekursor ciepłownictwa polskiego, prezes komitetu budowy Instytutu Politechnicznego w Warszawie i doktor Honoris Causa Politechniki we Lwowie.

Pierwszy scentralizowanym źródłem ciepła zlokalizowanym w budynku „Starej kotłowni” [36] była elektrociepłownia wyposażona w kotły parowe o ciśnieniu pary 5 atmosfer, dwie maszyny parowe po 120 KM ee każda, system centralnego ogrzewania parowy (5at zredukowane przed instalacjami wewnętrznymi w budynkach do 0,2at), z centralną siecią powrotu kondensatu, system wentylacyjny (nagrzewnice do 20°C – para pobierana była z maszyn parowych i kierowana na układ wymienników para-powietrze) oraz kanały wentylacyjne do obiektów (1,6m-3,6m zaizolowane termicznie wykładziną korkową) rozprowadzające gorące powietrze. Po I wojnie światowej system bezpośredniego ogrzewania parowego zmodernizowano i wymieniono na układ wodny z wymiennikami ciepła para-woda. W latach 50-tych XX wieku budynki położone na Terenie Głównym Politechniki Warszawskiej zostały podłączone do miejskiej sieci ciepłowniczej. Gruntowny remont sieci na terenie PW wraz z węzłami został przeprowadzony na początku lat 90-tych.

Ten nowoczesny na ówczesne czasy system skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej zapewniał Politechnice Warszawskiej całkowitą niezależność energetyczną.

Wytworzona energia elektryczna zasilala silniki elektryczne wentylatorów oraz zapewniała oświetlenie obiektów dydaktycznych.

Dla warunków obliczeniowych (-25°C) przyjęto moc maksymalną 6 400 000 ciepłostek (kalorii), co odpowiada mocy 7,4 MW na następującym cele:

- 4,2 MW na potrzeby centralnego ogrzewania,
- 2,0 MW na podgrzanie powietrza (min. temperatura powietrza - 5°C)
- 1,2 MW nawilżanie powietrza.

Roczną produkcję ciepła oszacowano na 45 tys.GJ co odpowiadało zużyciu opału w wysokości 20 000 korcy węgla. (Jeden korzec to ok. 128 litrów – jednostka stosowana dla ciał sypkich.)

Jednym z pierwszych miast w Polsce, w którym powstał system ciepłowniczy była Warszawa. Realizację inwestycji rozpoczęto od przebudowy elektrowni kondensacyjnej na Powiśle na elektrociepłownię o mocy 234 Gcal/h. (232 MWth) Elektrownia Powiśle powstała w 1904r o mocy 1,5 MW_{ee}, ale w okresie międzywojenny już osiągała moc 83 MW_{ee}

Pierwszą magistralę łączącą EC Powiśle z Pałacem Kultury i Nauki uruchomiono w grudniu roku 1953.

Parę lat później w roku 1956 prawobrzeżną Warszawę zaczęła zaopatrywać w ciepło elektrociepłownia Żerań. Wybudowano również tunel pod Wisłą (1960r.), aby zasilać w ciepło Żoliborz, Bielany i Młociny. W 1962 roku uruchomiono elektrociepłownię Siekierki.

Obecnie w Polsce szacuje się, że istnieje i jest eksploatowanych około 500 systemów ciepłowniczych [40]. Obsługuje 19 000 000 mieszkańców ogrzewając 472 mln m² powierzchni mieszkalnej. Produkcja w 2009 roku na potrzeby bytowo - komunalne wyniosła 337 PJ, dla sektora przemysłowego na potrzeby ogrzewania obiektów oraz technologiczne 151 PJ a dla potrzeb pozostałych sektorów np. usług 118PJ. Całkowita produkcja i dystrybucja ciepła sieciowego wyniosła 606 PJ.

3. Zasobnik ciepła

3.1. Klasyfikacja zasobników ciepła

Zasobnikiem ciepła określanym także słowem akumulator ciepła nazywamy urządzenie pracujące w systemie ciepłowniczym gromadzące energię cieplną.

Rozróżnia się dwa typy akumulacji energii[31]:

- jawny, polegający na zmianie temperatury czynnika magazynującego ciepło - ozn. TES (Thermal Energy Storage),
- utajony, bazujący na zmianie fazy czynnika magazynującego ciepło (topnienie, parowanie, zmiana struktury itp.) - ozn. PCMs (Phase Change Materials)

Przykładowe czynniki magazynujące ciepło i ich parametry zamieszczono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Zestawienie czynników akumulujących energię cieplną

Table 3.1 List of materials accumulating thermal energy

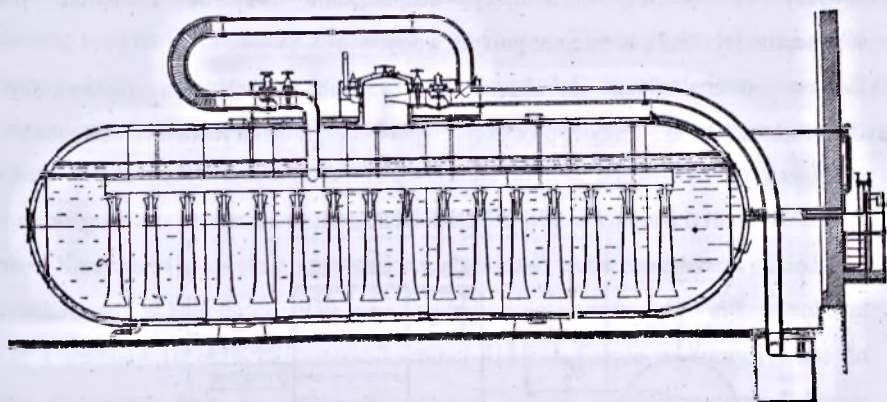
	Czynnik	Gęstość cieplna [10 ⁶ J/kg]	Gęstość cieplna [10 ⁹ J/m ³]	Zakres temperatur [°C]
Zmiana temperatury	Woda w stalowym zbiorniku	0,208	2,08	20-200
		0,54	0,54	350
		2,2	2,2	500
	Skąła	0,04	0,1	20-100
	Stal	0,021	0,18	20-350
Zmiana fazy	Lód	0,335	0,33	0
	Parafina	0,17	0,14	55
	Sól uwodniona np. (Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O)	0,2	0,3	30-70
	Woda	2,27	2,27	100
	Wodorek litu	4,7	4,7	686
	Fluorek litu	1,1	2,73	850

Zagadnienie magazynowania ciepła jest problemem wieloaspektowym. Poza wyborem sposobu akumulacji i czynnika magazynującego energię cieplną pozostaje problem konstrukcji zbiornika jak i jego miejsca w systemie ciepłowniczym.

3.2. Zasobniki pary - rys historyczny

W układach parowych pracujących w zakładach przemysłowych powszechnie stosowano zasobniki-akumulatory pary określane także nazwą zasobnice bądź ciepłarki.[27] Do najbardziej rozpowszechnionych zaliczano zasobniki konstrukcji Rateau, Ruths'a tzw. mokry (rys 3.1) - opatentowany w 1913 roku oraz typu Harle

(teleskopowe) bądź Estner-Ladewig o stałej objętości - określane jako suche. Ich celem było magazynowanie nadmiaru wytworzonej pary w chwili gdy obciążenie silników, turbin bądź kotłów gwałtownie malało.



Rysunek 3.1 Schemat zasobnika pary Ruths'a [27]
Figure 3.1 Scheme of the steam Ruths's storage

Zasobnik Ruths'a (cieplarki nieizobaryczne) [27] – powszechnie stosowane były do kompensowania dużych wahań w poborze pary w stałym przedziale czasowym zwykle ograniczonym do 24 godzin. Para zasilająca zasobnik jest parą przegrzaną, następnie ulega wymieszaniu z wodą wewnątrz zbiornika. Para opuszczająca zasobnik jest parą nasyconą powstającą na skutek odparowania wody wewnątrz zbiornika – stąd nazwa zasobnik „mokry”.

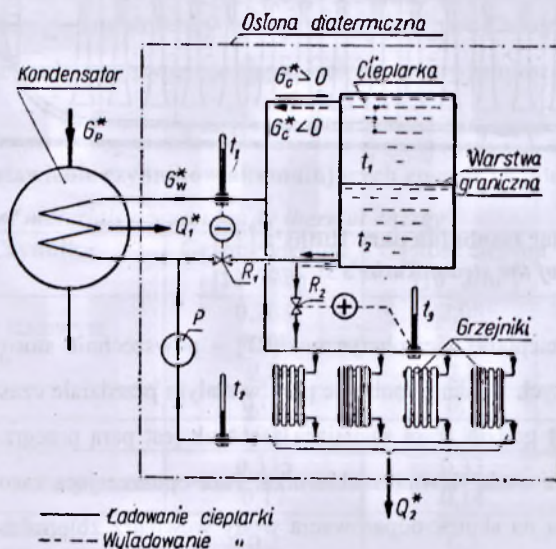
Na bazie tej konstrukcji powstały pierwsze zasobniki izobaryczno-nieizotermiczne, budowane jako wysokie zbiorniki pionowe. Kondensacja pary zachodzi wówczas w górnej części zbiornika. W zasobniku występuje zjawisko stratyfikacji temperatury wody czyli podział na warstwy wody różniące się temperaturą. Obszar wody gorącej i ochłodzonej rozdziela warstwa dyspersyjna, w której następuje znaczący skok temperatury.

Stosując zasobnik zgodny z niemieckim patentem dr Ruths'a w 1929 powstała instalacja w Malmo – Szwecja. Jednak największa i pracująca od 1929 roku do dziś znajduje się w Charlottenburgu – Berlinie (Niemcy). Ciśnienie robocze układu wynosi 14 bar, moc elektryczna 50 MW a pojemność cieplna zasobnika kształtuje się na poziomie 67MWh.

W latach 60-tych zasobnik takiej konstrukcji adresowany był wyłącznie do współpracy z kotłem parowym, gdyż dolna strefa zbiornika stanowiła jednocześnie zbiornik kondensatu.

Dla systemów grzewczych proponowany był układ wyposażony w dodatkowy zbiornik stanowiący kondensator, eliminujący bezpośrednie zasilanie zasobnika parą wysokoprężną (rys. 3.2), w miejsce gorącej wody.

Układ ten jest analogiczny do obecnie stosowanych w systemach ciepłowniczych zasilanych ze źródeł skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej.



Rysunek 3.2 Schemat zasobnika nieizotermicznego w systemie centralnego ogrzewania [18]

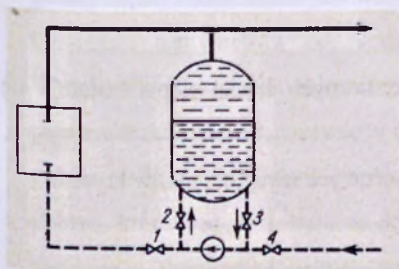
Figure 3.2 Scheme of non isothermal storage in the central heating system

Kamler [4] opisywał zasobniki ciepła, jako urządzenia stosowane w ciepłowniach do zabezpieczenia przed wahaniami i przed krótkotrwałymi szczytami obciążenia urządzeń wytwarzających ciepło. W elektrociepłowniach stosowane dla wyrównania w czasie zapotrzebowania na energię elektryczną i dostawy ciepła. Zgodnie z definicją zasobnik stanowił rozdzielacz hydrauliczny pomiędzy źródłem a siecią ciepłowniczą, który zmniejszał nierównomierność zapotrzebowania na ciepło sprowadzając do stałego obciążenia źródła bądź nadążając za produkcją energii elektrycznej. Kamler jako postawę swoich rozważań przyjął zasobnik Ruths'a i zagadnienia magazynowania ciepła w postaci pary.

Nie mniej w [4] pojawia się pojęcie magazynowania ciepła przy wykorzystaniu dużej pojemności wodnej urządzeń w sieciach wodnych i instalacjach ogrzewczych a w przypadkach, gdy należy magazynować wodę gorącą dla potrzeb ogrzewania podaje za celowe stosowanie zasobników włączonych w sieć.

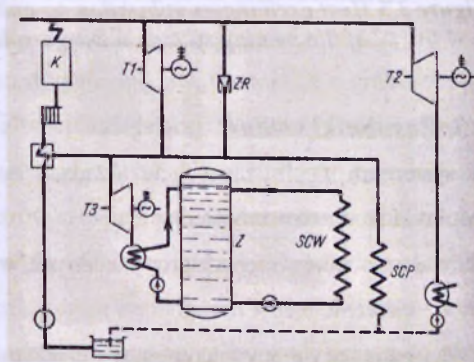
Na rys. 3.3 przedstawiono zasobnik ciepła włączony w sieć ciepłowniczą. Wykorzystuje on różnicę temperatur pomiędzy zasilaniem a powrotem. Zwyczajowo, jako zasobniki stosowane kotły cylindryczne pionowe. Na rys. 3.3 przedstawiono zasobnik bezcisnieniowy, przepływowy, bez poduszki gazowej lub parowej w górnej części zbiornika stabilizującej nadciśnienie. Rozwiązanie to jest pierwowzorem zasobnika rozproszonego, który jest przedmiotem omawianych analiz w kolejnych rozdziałach.

Zdaniem Kamlera [4] jednym z największych rozwiązań technicznych w tej dziedzinie był uruchomiony w Hamburgu 1930 roku zasobnik o pojemności 2600 m^3 , wysokości $35,5 \text{ m}$ i średnicy 10 m , o pojemności cieplnej 418 GJ . Ciepło wykorzystywane do procesu ładowania było to ciepło odlotowe z turbiny kondensacyjnej. Schemat przedstawiono na rys. 3.4.



Rysunek 3.3 Zasobnik ciepła włączony w system ciepłowniczy bezpośrednio [4]

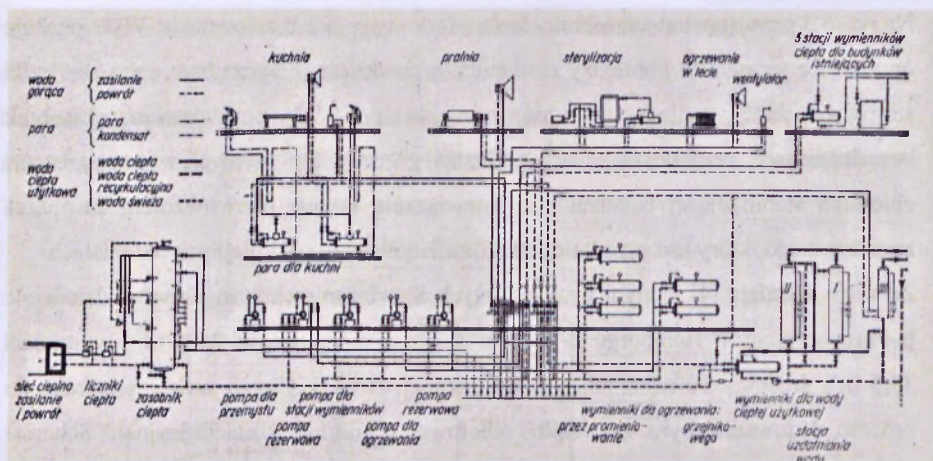
Figure 3.3 Heat storage directly turned on in the heating system



Rysunek 3.4 Schemat elektrociepłowni w Hamburgu z włączonym zasobnikiem ciepła [4]
SCW - sieć ciepłownicza wodna,
SCP - sieć ciepłownicza parowa

Figure 3.4 Scheme of CHP plant in Hamburg with a heat storage:
SCW- water heating network,
SCP- steam heating network

Drugim przykładem cytowanym za Kamlerem [4] jest zasobnik ciepła współpracujący z węzłem ciepłowniczym wielofunkcyjnym wodno-parowym obsługującym szpital w Bazylei. Schemat technologiczny węzła przedstawiono na rysunku 3.5. W tym przypadku jest to zasobnik włączony bezpośrednio w obieg wodny.



Rysunek 3.5 Węzeł ciepłowniczy współpracujący z zasobnikiem ciepła zasilany z sieci ciepłowniczej Burgerspital Bazyleja Szwajcarii [4]
Figure 3.5 Heat exchangers substation co-operating with the thermal energy storage of the heating system in Burgerspital Basel Switzerland

3.3. Zasobniki wodne

W systemach ciepłowniczych w układach hydraulicznych źródeł ciepła instaluje się zasobniki wodne tzw. waporowe.

Podział zasobników ciepła z grupy wodnych, waporowych uwzględnia trzy kryteria:

- ciśnienie pracy,
- parametry pracy – temperatura maksymalna i minimalna
- oraz pojemność czyli wymiary geometryczne.

Ze względu na wielkość rozróżnia się zasobniki ciepła:

- duże – o pojemności powyżej 10 000 m³,
- średnie o pojemności pomiędzy 1 000 m³ a 10 000 m³ oraz
- małe o pojemności poniżej 1 000 m³.

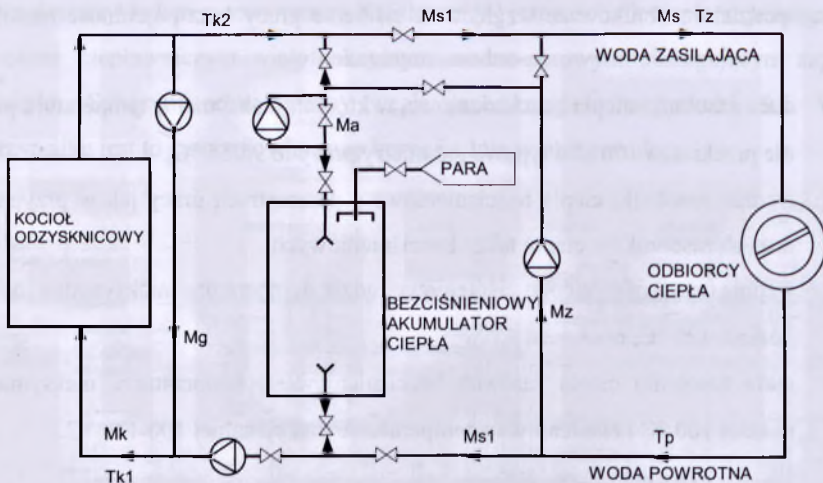
Zasadniczy podział zasobników ciepła to zasobniki ciśnieniowe oraz beciśnieniowe włączone do systemów ciepłowniczych pośrednio za pomocą zespołu wymienników lub bezpośrednio.

Łącząc podział zasobników ze względu na ciśnienie pracy oraz pojemność rozróżnia się:

- duże zasobniki ciepła bezciśnieniowe, w których maksymalna temperatura pracy nie przekracza 100°C a typowe parametry pracy to $95/55^{\circ}\text{C}$,
- średnie zasobniki ciepła bezciśnieniowe o parametrach pracy jak w przypadku dużych zasobników ciepła także bezciśnieniowych,
- średnie zasobniki ciepła ciśnieniowe gdzie temperatura maksymalna osiąga poziom 120°C , oraz
- małe zasobniki ciepła zarówno bezciśnieniowe o temperaturze maksymalnej poniżej 100°C i ciśnieniowe o temperaturze maksymalnej $100-140^{\circ}\text{C}$.

Schematy zastosowania wodnego, waporowego zasobnika ciepła w systemie ciepłowniczym przedstawiono w [37]. Tego typu zasobnik ciepła jest pionowym, najczęściej cylindrycznym zbiornikiem, połączonym bezpośrednio lub pośrednio z siecią ciepłowniczą [24,33,34,38]. Z eksploatacyjnego punktu widzenia zbiornik powinien być smukły tj. proporcja wysokości zbiornika do jego średnicy powinna być większa bądź równa co najmniej 3. W zasobniku gorąca woda gromadzi się w jego górnej części i oddzielona jest warstwą dyspersyjną tzw. termokliną o grubości zwykle kilkunastu centymetrów od wody zimnej zalegającej w dolnej części zbiornika. Wysokości tego typu zbiorników sięgają nawet kilkudziesięciu metrów, a ich pojemność kilkudziesięciu tysięcy metrów sześciennych. Podczas ładowania zasobnika, gorąca woda z generatorów ciepła (kotłów, silników, turbin) wypycha zimną wodę ku dołowi, która następnie wpływa do kolektorów zasilających kotły lub inne urządzenia wytwórcze. Przy rozładowywaniu zaś woda powrotna wypiera wodę gorącą do góry, do rurociągu zasilającego sieć ciepłowniczą.

Schemat zastosowania bezciśnieniowego zasobnika ciepła w systemie ciepłowniczym przedstawiono na rys. 3.6. W tym przypadku wysokość zbiornika tj. wysokość zwierciadła wody (ciśnienie hydrostatyczne) równoważy ciśnienie na ssaniu pomp obiegowych. Zbiornik jest wtedy bezciśnieniowy tak więc koszt zbiornika jest niższy niż dla przypadku ciśnieniowych, waporowych zasobników ciepła.



Rysunek 3.6 Schemat systemu ciepłowniczego z centralnym, bezcisnieniowym zasobnikiem ciepła [37]

Figure 3.6 Scheme of the district heating system with central, pressureless thermal energy storage

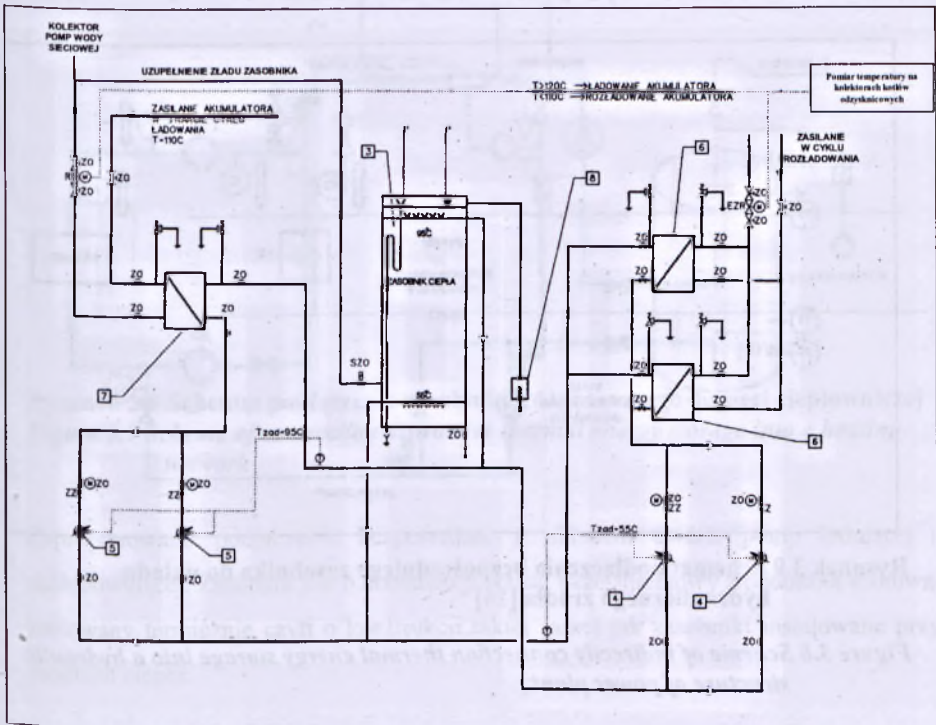
Urządzenie to pełni jeszcze dodatkową, istotną funkcję w przypadku szczelnych sieci ciepłowniczych. Bezpośrednie włączenie przewodu powrotnego daje możliwość magazynowania nadmiaru wody w zładzie sieci, który powstaje wraz ze wzrostem temperatury czynnika, na skutek rozszerzalności termicznej; (odpowiednik naczynia wzbiorczego dla instalacji wewnętrznych centralnego ogrzewania). W celu uniknięcia penetracji tlenu z powietrza atmosferycznego do wody w zbiorniku akumulacyjnym, należy nad lustro wody doprowadzać parę wodną lub azot z butli z azotem.

W praktyce zasobnik może być włączony w układ hydrauliczny w sposób bezpośredni.

Zasobnik podłączony jest poprzez zestawy wymienników ładujących i rozładowywujących. Obieg wodny zasobnika jest wydzielony od wody krążącej w systemie ciepłowniczym. Rozwiązanie to posiada dwie wady:

1. Zasobnik nie może być naczyniem wzbiorczym dla sieci,
2. Układ wymienników generuje dodatkowe straty ciepła.

Na rys. 3.7 przedstawiono schemat z podłączeniem zasobnika w sposób pośredni.



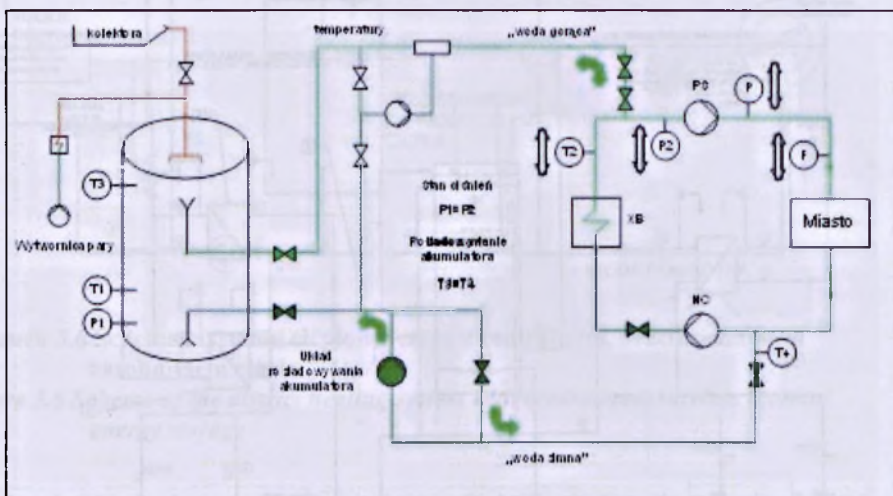
Rysunek 3.7 Schemat podłączenia pośredniego zasobnika do układu hydraulicznego źródła [12]

Opis: 3–zasobnik ciepła, 4–pompy rozładowania zasobnika, 5–pompy ładowania zasobnika, 6– bateria wymienników rozładowujących, 7 – bateria wymienników ładujących, 8- pomocnicza, elektryczna wytwarzająca parę.

Figure 3.7 Scheme of indirectly connected thermal energy storage with a hydraulic structure of power plant

Legend: 3 – thermal energy storage, 4- load pumps, 5 – unload pumps, 6- set of unload heat exchangers, 7- set of load heat exchangers, 8- supportive steam generator.

Na rys. 3.8 przedstawiono schemat podłączenia zasobnika w sposób bezpośredni na przykładzie zasobnika pracującego w EC Siskierki w Warszawie

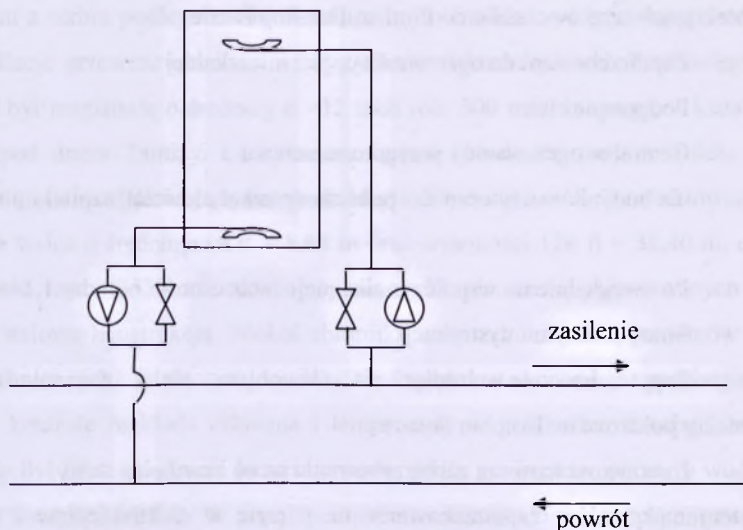


Rysunek 3.8 Schemat podłączenia bezpośredniego zasobnika do układu hydraulicznego źródła [14]

Figure 3.8 Scheme of indirectly connection thermal energy storage into a hydraulic structure of power plant

W niniejszej pracy analizowano wpływ eksploatacji zasobników ciepła tzw. rozproszonych zainstalowanych w pewnej odległości od źródła ciepła na pracę sieci ciepłowniczej. Nazwą rozproszone określono zasobniki podłączone do sieci ciepłowniczej nie bezpośrednio przy źródle ciepła – rozproszone w obszarze sieci.

Na rys. 3.9 zamieszczono schemat podłączenia bezpośredniego zasobnika położonego z dala od źródła ciepła. Autor niniejszej pracy wprowadził określenie zasobnik rozproszony, co oznacza zasobnik włączony w układ hydrauliczny sieci poza obiegami hydraulicznymi źródła ciepła, poza obszarem źródła ciepła.



Rysunek 3.9 Schemat podłączenia zasobnika rozproszonego do sieci ciepłowniczej
Figure 3.9 Scheme of connection distractive thermal energy storage into a heating network

Zaproponowano podłączenie bezpośrednio z układem dwóch pomp ładującej i rozładowującej. Zasobnik jest o konstrukcji walca, beciśnieniowy z poduszką azotową, izolowany termicznie czyli o konstrukcji takiej samej jak zasobniki instalowane przy źródłach ciepła.

3.4. Rys historyczny – przykłady instalacji

Najstarszym przykładem tego typu instalacji w Europie jest **Pimlico w Westminster**. Zasobnik uruchomiony został w latach 1950-1952 [10].

System ten pracował zarówno na potrzeby centralnego ogrzewania jak i przygotowania centralnie ciepłej wody użytkowej dla ponad 10 000 osób (w roku 1951). Rejon zasilany przez Przedsiębiorstwo Pimlico był to obszar o powierzchni 30 akrów (12,14 ha), położony nad brzegami Tamizy, obejmujący obiekty należące do Pimlico Housing Estate, Dolphin Square oraz Russel House - razem ok. 2900 mieszkań. Kalkulacje z okresu budowy i uruchomienia systemu czyli ok. 1951 roku wykazały następujące zapotrzebowania na moc wyrażone w jednostkach angielskich B.T.U./h (British Thermal Unit; 1B.T.U=1,05506 kJ):

Obiekty należące ówczasnie do Pimlico Housing Estate

Zapotrzebowani do ogrzewania części mieszkalnej	28 170 000
Podgrzanie cwu	12 350 000
Centralne ogrzewanie i przygotowanie cwu dla budynków użyteczności publicznej: szkoły kościołów, szpital itp.	6 880 000
Razem	47 400 000
Po uwzględnieniu współczynnika niejednoczesności odbioru 1,1	43 000 000
Straty przesyłu i dystrybucji	1 720 000
Zapotrzebowanie w źródle	44 720 000

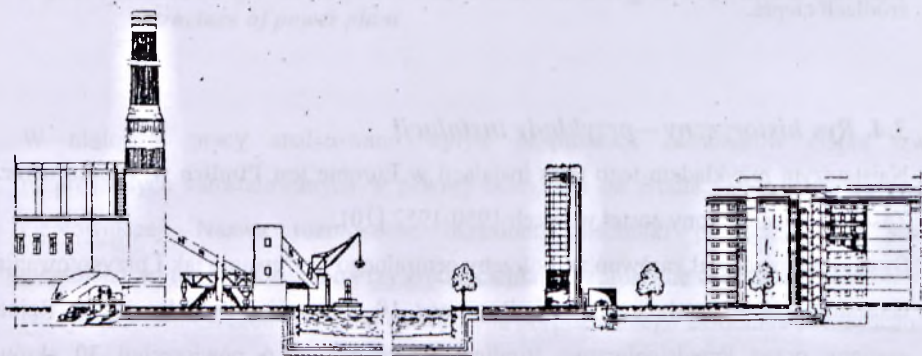
Obiekty położone na Dolphin Square

Łącznie oszacowane zapotrzebowanie na co i cwu plus straty **28 000 000**

Zatem maksymalne zapotrzebowanie na energię w elektrociepłowni szacowano na poziomie

73 000 000 B.T.U. /h co równa się 21,39 MW.

System ciepłowniczy składał się z źródła – elektrociepłowni Battersea – położonego na przeciwległym brzegu rzeki, stacji wymienników, zasobnika ciepła oraz sieci ciepłowniczej wysokoparametrowej zasilającej węzły bezpośrednie bądź pośrednie usytuowane w każdym budynku (rys. 3.10).



Rysunek 3.10 Widok elektrociepłowni Battersea i zasobnika ciepła w Pimlico [10]
Figure 3.10 Prospect of Battersea's CHP power plant and a thermal energy storage in Pimlico

Elektrociepłownia Battersea wyposażona była w dwie turbiny parowe przeciwpiężne o mocy termicznej 1,35 MW każda. Według danych szacunkowych roczna produkcja energii elektrycznej kształtowała się na poziomie ok. 9 000 MWh.

Para po wyjściu z turbin podlegała schłodzeniu w wymiennikach podgrzewając wodę zasilającą instalacje grzewcze obiektów należących do elektrociepłowni. Przeciwny brzeg zasilany był magistralą o średnicy $d = 12$ inch (ok. 300 mm) biegnącą w kanale przelazowym pod dnem Tamizy. Łączyła ona system chłodzenia pary w źródle z pompownią ładującą -rozładowującą zasobnik ciepła. Zbiornik zasobnika zbudowany był w kształcie walca o średnicy 29 ft = 8,84 m oraz wysokości 126 ft = 38,40 m, co oznacza objętość rzędu 2350 m³, składający się z 21 pierścieni, zaizolowanych i obudowanych stalową konstrukcją. Wokół zbiornika umieszczono sześć poziomów – pomostów technicznych gdzie znajdowała się aparatura kontrolno pomiarowa umożliwiająca kontrolę rozkładu ciśnienia i temperatury w zasobniku. Zasobnik ten zaprojektowany był jako urządzenie bezciśnieniowe, gdzie gradient temperatury wody wynosił 70-80°F czyli 21-27°C. W stacji pomp umieszczono dwa układy pompowe zasilające osiedle Pamlico Housing Estate oraz jeden zestaw przeznaczony do obsługi kompleksu mieszkaniowego Dolphin Square. Zasobnik wraz z stacją pomp położony był centralnie na obszarze zasilanym przez system ciepłowniczy co umożliwiło wydzielenie sześciu niezależnych podsystemów zasilania w ciepło. Zadaniem zasobnika ciepła była przede wszystkim stabilizacja obciążenia źródła wobec zmiennych potrzeb ciepłych odbiorców w okresie doby. Ponadto inwestycja w zasobnik była jednym z tańszych rozwiązań zapewniających dostawę energii cieplnej dla nowobudowanych osiedli. Do konkurencyjnych projektów z tego okresu należałoby zaliczyć:

- budowę dodatkowego kotła parowego bądź wodnego w istniejącej elektrociepłowni,
- inwestycję w nową elektrociepłownię położoną wśród nowych budynków oraz
- budowę nowego źródła na bazie pomp ciepła korzystających z ciepła niskotemperaturowego jakiego zapewnia woda z Tamizy.

Kolejne przykłady zastosowania zasobników ciepła to instalacje współczesne, chociaż wyposażone w zasobniki ciepła w latach 80-tych ubiegłego wieku.

Pierwszym przykładem jest system ciepłowniczy miasta Kolonia, należący do multi-energetycznego przedsiębiorstwa Gas -Elektrizitats und Wasserwerke Koln AG(GEW)[26]. Łączna moc cieplna przyłączeniowa w systemie wynosi 710 MW.

Potrzeby odbiorców zaspokajane są z kilku źródeł pracujących na wspólna sieć:

- Elektrociepłowni w centralnej części miasta, wyposażonej w turbinę przeciwprężną pokrywającą szczytowe rozbiory ciepła,

- Elektrociepłowni Niehl- z parową turbiną upustowo-kondensacyjną,
- Elektrociepłowni Niehl – instalacji gazowej traktowanej jako źródło szczytowe oraz
- Ciepłowni rezerwowej Deutz.

Moc źródeł wynosi 583,4 MW. Obciążenie z sezonie zimowych osiąga wartości do 450 MW natomiast w okresie letnim – 50 MW.

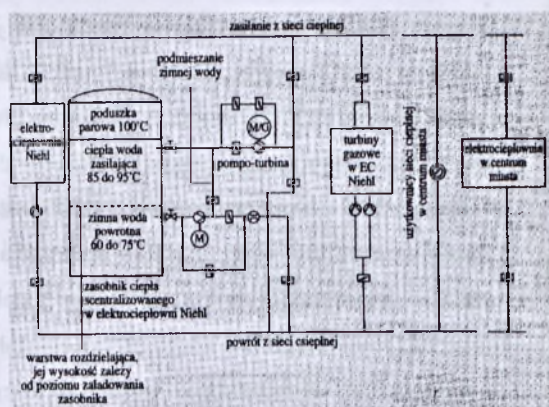
W systemie tym od 1995 pracuje zasobnik ciepła o pojemności 25 000 m³. Jest to przebudowany zbiornik oleju opałowego ciężkiego, który do 1986 roku był wykorzystywany przez elektrociepłownię Niehl. Zasada działania tego obiektu polega na magazynowaniu ciepła w okresach wolnej mocy produkcyjnej w źródle i przekazaniu jej do sieci ciepłowniczej w okresach maksymalnego zapotrzebowania na energię cieplną (rys. 3.11).

Zasobnik ciepła jest urządzeniem beciśnieniowym o stałym poziomie wody. Górną część zbiornika wypełnia poduszka parowa. Maksymalny gradient temperatury wody wynosi 35-38 °C, przy założeniu, że maksymalna temperatura wody zasilającej wynosi 98°C a wody powrotnej 60°C. Maksymalna moc rozładowywania równoważna jest przepływowi 2000 m³/h co odpowiada ok. 80 MW, moc ładowania jest nieco mniejsza i kształtuje się na poziomie 65MW co równoważne jest z przepływem 1600 m³/h.

Poza rolą akumulacji ciepła zasobnik pełni dwie istotne funkcje:

- służy, jako zbiornik rezerwowy wody sieciowej przejmując jej nadmiar w systemie np. na skutek zmian objętości wraz ze wzrostem temperatury,
- stabilizuje ciśnienie w przewodzie powrotnym.

Obie te funkcje są możliwe, gdy zasobnik ciepła współpracuje bezpośrednio z obiegami hydraulicznymi sieci poprzez zespoły turbopompowe i układy zaworów dławiących.



Rysunek 3.11 Schemat podłączenia zasobnika do sieci ciepłowniczej- elektrociepłownia Niehl [26]

Figure 3.11 Scheme of connection a thermal energy storage into heating network – CHP power plant in Niehl

Koszty inwestycyjne adaptacji zbiornika na zasobnik ciepła oraz pozostałych elementów towarzyszących włączeniu do układów hydraulicznych wyniosły ok. 7 mln DM, a prosty czas zwrotu nie przekroczył 5 lat. Na tak korzystny rachunek ekonomiczny mają wpływ następujące przesłanki:

1. zwiększenie produkcji energii elektrycznej w okresach obowiązywania wysokich taryf,
2. zastąpienie ciepłowni szczytowych zasobnikiem ciepła
3. wyeliminowanie strat wody uzdatnionej wynikających z odwadniania części instalacji bądź rozszerzalności cieplnej wody w systemie.

W północnej części Europy, w jednym z największych systemów ciepłowniczych miejskich współpracujących z zasobnikiem ciepła jest przedsiębiorstwo **Vartaverket** działające na terenie **Sztokholmu** [45]. System ciepłowniczy zasilający miasto składa się z kilku niezależnych podsystemów zasilanych z 13 źródeł, wykorzystujących m.in. kotły węglowe, gazowe, olejowe, podgrzewacze elektryczne, pompy ciepła, turbiny gazowe w układach skojarzonych jak i farmę wiatrową.



Rysunek 3.12 Zasobnik ciepła pracujący w systemie ciepłowniczym Sztokholmu [45]

Figure 3.12 Thermal energy storage co-operating with a district heating system in Stockholm

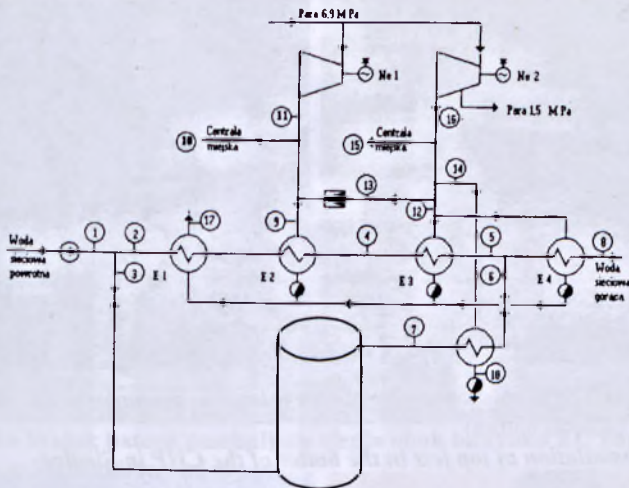
W centralnym systemie ciepłowniczym od 1981 roku pracuje zasobnik ciepła (rys. 3.12). Wykonany jest w formie walca o średnicy ok. 40 m i wysokości ok. 30 m, o pojemności 40 000 m³. Podobnie jak w innych systemach miejskich jest to zasobnik o ciśnieniu atmosferycznym z dopuszczalną temperaturą wody 95°C. Pojemności cieplna wynosi 2 000 MWh, a maksymalny przepływ podczas cyklu ładowania bądź rozładowywania wynosi 10 000 m³/h co odpowiada mocy rzędu 500 MW.

Pracuje on zarówno w okresie sezonu grzewczego jak i lata, stabilizując poziom obciążenia źródła bądź dając czas na rozruch kolejnych jednostek kotłowych podczas gwałtownych zmian temperatury zewnętrznej.

W Europie największa liczba zasobników jest eksploatowana w krajach skandynawskich. W Danii [12] jest ich ponad 1000 o pojemnościach od 50 m³ do 75 000 m³ [6]. Największe zasobniki współpracują ze źródłami w: Hjorring – 35 900m³, Esbjerg – 52400 m³, Skaerback – 27 200m³ Studstrup – 32 000m³ Fynsvaerket – 75 000m³.

Przykładem zastosowania zasobnika ciepła w **Polsce** jest jeden z pierwszych systemów wody grzewczej w ówczesnych Zakładach Azotowych „Kętrzyn” S.A. obecnie ZAK S.A. w Kędzierzynie-Koźlu [16]. Podstawową funkcją zasobnika było umożliwienie zróżnicowania produkcji energii elektrycznej przez turbozespoły przeciwprężne w elektrociepłowni, zależnie od okresów taryfowych narzuconych przez cennik energii elektrycznej sieci krajowej, poprzez zmiany w poborze pary dla układów grzewczych. Dodatkowo zasobnik ciepła zwiększał bezpieczeństwo zasilania obiektów Zakładów Azotowych podczas krótkotrwałych awarii źródła ciepła. Schemat podłączenia zasobnika ciepła przedstawiono na rys. 3.13. Zasobnik ciepła w analizowanym przykładzie współpracował z centralą ciepłowniczą o mocy nominalnej 151 MW, temperaturze wody zasilającej 145°C / powrotnej 70°C, i przepływie nominalnym 1200 m³/h. System ten pracował na potrzeby ogrzewania obiektów a zatem w sezonie grzewczym na ogół od października do kwietnia.

Zasobnik ciepła składa się z baterii 4 zbiorników o średnicy 5m i wysokości 26 m każdy, o łącznej objętości 2000 m³. Ciśnienie robocze w zbiornikach wynosi 0,3 MPa nadciśnienia co umożliwiało utrzymanie maksymalnej temperatury wody na poziomie 115 °C. Strumień wody ładującej zasobnik wynosił 200 m³/h, różnica temperatur wody zasilającej i powrotnej wynosi 50 °C co równoważne jest ze zdolnością akumulacyjną 11,2 MW. Średni czas cyklu ładowania i analogicznie rozładowania trwał ok. 9h. Okres ładowania przypadał na taryfę szczytową oraz częściowo dzienną, natomiast rozładowania odbywało się w trakcie obowiązywania taryfy nocnej. W strukturze zakupu energii elektrycznej przez ówczesne Z.A. „Kędzierzyn” S.A. taryfa szczytowa to 24,3% udziału czasowego, natomiast nocna 37,5%.



Rysunek 3.13 Schemat centrali ciepłowniczej współpracującej z zasobnikiem ciepła [16]

Figure 3.13 Scheme of heating central station co-operating with a thermal energy storage

Oznaczenia na rysunku 13: E-1 – schładzacz kondensatu, E-2 wymiennik podstawowy, E-3 i E-4 wymienniki szczytowe, liczby od 1-18 wskazują punkty bilansowe układu.

Z analizy techniczno-ekonomicznej wynika, że zasobnik ciepła umożliwił przyrost produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowni o 4996 MWh w cyklu ładowania zasobnika oraz zmniejszenie o 5133 MWh w cyklu rozładowania. Przy założeniu kosztów inwestycyjnych pomiędzy 800 a 1 200 tys. zł. (w odniesieniu do poziomu cen z 1994 roku), stóp dyskontowych 7-10 % oraz okresu eksploatacji 15 lat, NPV utrzymywało wartość dodatnią w całym zakresie cenowym a IRR wahała się od 15 % do 25%. Analiza ekonomiczna wykazała jednoznacznie opłacalność inwestycji w przypadku układu grzewczego.

Obecnie w Polsce jest kilka systemów ciepłowniczych wyposażonych w zasobniki ciepła. Opisane jako stanowisko badawcze zasobnik w Siedlcach – 800 m³, w Warszawie w EC Siekierki 30 400 m³ oraz dwa w budowie w EC Kraków – 20 015 m³ oraz w EC Białystok 12 800 m³ [48].

Wszystkie wymienione powyżej są to zasobniki ciepła bezciśnieniowe wyposażone w poduszkę parową. Na rys. 3.14 i 3.15 zamieszczono zdjęcia z montażu elementów zasobników w Siedlcach i w Warszawie.



Rysunek 3.14 Dysza górna zasobnika ciepła w trakcie montażu w EC Siedlce (zdjęcia autora)

Figure 3.14 Installation of top jets in the boiler of the CHP in Siedlce



Montaż dyszy dolnej

Bottom jet installation

Montaż izolacji

Isolation installation

Rysunek 13.15 Zasobnik w Warszawie EC Siekierki (zdjęcia autora)

Figure 13.15 Thermal energy storage in the CHP Siekierki in Warsaw

W EC Fortum Świebodziu eksploatowany jest zasobnik składający się z dwóch sekcji w każdej po 5 zbiorników o pojemności 50 m^3 połączonych szeregowo tworzą zasobnik o pojemności 600 m^3 (rys. 3.16).

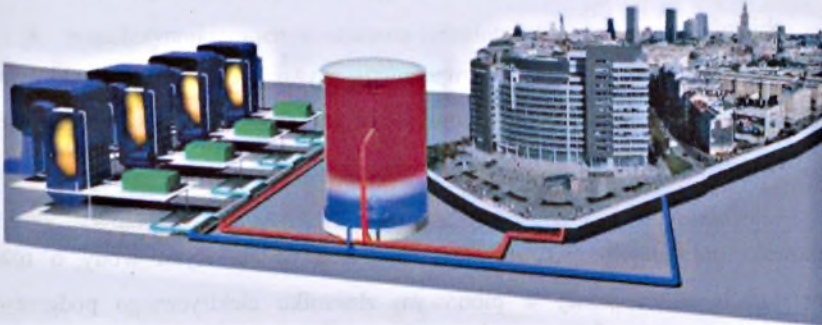


Rysunek 3.16 Widok baterii zasobników ciepła obok budynku EC Fortum w Świebodzicach [49]

Figure 3.16 View of the thermal energy storages next to the CHP power plant Fortum in Świebodzice

Zasobnik ten wykorzystuje zjawisko magazynowania energii cieplnej w sieci ciepłowniczej, ponieważ pracuje jako zbiornik przepływowy. Zjawisko magazynowania ciepła w sieci ciepłowniczej opisano w rozdziale 7 niniejszej pracy.

Na rys. 3.17 przedstawiono schemat poglądowy zasobnika współpracującego z miejską siecią ciepłowniczą.



Rysunek 3.17 Schemat poglądowy podłączenia zasobnika ciepła do miejskiej sieci ciepłowniczej [14]

Figure 3.17 Scheme of connecting thermal energy storage with a district heating system

3.5 Stratyfikacja temperatury w zasobniku ciepła

Przy zachowaniu odpowiedniej proporcji pomiędzy kształtem, wielkością zbiornika a strumieniami czynnika wpływającego i wypływającego zachodzi rozwarstwienie termiczne polegające na podziale na dwie strefy o zbliżonej, stałej temperaturze: wody gorącej i ochłodzonej [24,25]. Zmiana temperatury zachodzi w stosunkową małej wysokości zbiornika określanej mianem warstwy dyspersyjnej – termokliny. Uzyskaniu trwałej stratyfikacji sprzyja odpowiednia smukłość zbiornika tj. proporcja wysokości do długości średnicy mieszczący się w granicach od 3:1 do 4:1.

Czynniki wpływające na rozkład temperatury wewnątrz zasobnika to:

- przewodzenie ciepła w płynie w kierunku pionowym,
- przewodzenie ciepła w kierunku pionowym przez ściany zbiornika,
- straty ciepła do otoczenia.
- wzajemne usytuowanie króćców wody zasilającej i powrotnej.

Zjawisko zachodzące w pionowym zbiorniku, w którym umieszczono płyn o różnych temperaturach nosi nazwę termicznego uwarstwienia, czyli stratyfikacji. Stratyfikacja płynu wg Pieńkowskiego [23] dzieli się na:

- Niestatyczna – wówczas, gdy płyn; w analizowanym przypadku woda; o temperaturze niższej znajduje się nad wodą o temperaturze wyższej. Siły wyporu są większe od sił ciężenia i woda cieplejsza wypływa nad wodę chłodniejszą powodując wymieszanie.
- Obojetna – gdy woda w zbiorniku jest równomiernie wymieszana w całej objętości,
- Statyczna – gdy woda o temperaturze wyższej znajduje się nad wodą o temperaturze niższej. Siły wyporu w tym przypadku są większe od sił ciężenia, więc warstwy nie ulegają wymieszaniu.

Pieńkowski przedstawił opis zjawiska zachodzącego na styku wody o różnych temperaturach umieszczonej w pionowym zbiorniku elektrycznego podgrzewacza wody. Stwierdził, że na powierzchni styku dwóch warstw tworzy się statyczna burzliwa warstwa zwana warstwą dyspersyjną, przy założeniu, że styk czyli zetknięcie się warstw następuje w czasie $t=0$, natomiast warstwa tworzy się w czasie $t>0$ w wyniku procesu burzliwego mieszania się obu czynników. Na skutek różnicy temperatur cząsteczki wody w pierwszej fazie tworzą ruch drgający.

Gdy drania wzrosną a ich amplituda osiągnie wartość skończoną rozkład prędkości tworzy literę „S” a tym samym cała warstwa zaczyna falować tworząc lokalne drobne wiry. Na tym etapie jest to ruch nieustalony a objętość warstwy stale rośnie.

Znajdują się w niej cząsteczki o różnej gęstości a zatem charakteryzujące się zróżnicowaną siłą ciężenia.

Także siła wyporu niezbędna do przemieszczenia cząsteczek jest różna. Przemieszczanie się cząsteczek w kierunku pionowym (górze – dół) powodują zmiany energii. Dlatego też energia potencjalna w obrębie warstwy może zmieniając się na energię turbulencji i odwrotnie energia turbulencji na potencjalną energię wody o niejednorodnej gęstości. Turbulencja odbywa się w warstwie dyspersyjnej, ponieważ przemieszczenia cząsteczek poza nią wymagałyby zbyt dużej energii dla przeciwdziałania siłom wyporu. Dlatego też można przyjąć, że w zbiorniku zachowany jest stateczny układ stratyfikacji zwany także stateczno-burzliwą warstwą rozdziału wody.

Badania fizykałne Pieńkowski [23] przeprowadził na przykładzie elektrycznego podgrzewacza wody. Potwierdziły one słuszność przedstawionego powyżej opisu zjawiska oraz zostały zweryfikowane w zaproponowanym modelu matematyczny oparty na opisach Monina i Jağłom i Ellisona.

Charakter statecznie burzliwej warstwy rozdziału [23] Pieńkowski opisał:

- gradientem temperatury,
- współczynnikiem wymiany impulsu,
- współczynnikiem temperaturowo-turbulentnego strumienia ciepła,
- momentem pulsacji temperatury,
- drogi mieszania.

W celu uproszczonego scharakteryzowania turbulencji termicznej w warstwie wprowadził określenie intensywności turbulencji (wielkość bezwymiarowa).

$$I_t = \frac{\overline{c'_z T'}}{T \sqrt{\overline{c'_x c'_z}}} \quad (3.1)$$

gdzie:

z - wysokość położenia na osi pionowej prostokątny układ współrzędnych, przy czym z = 0 oznacza powietrznie styku warstw (m),

T - temperatura średnia (K)

c'_x, c'_z - składowe prędkości przepływu w układzie prostokątnym x, y, z (m/s),

$\overline{c'_z T'}$ - moment pulsacji temperatury (mK/s),

$\overline{c'_x c'_z}$ - moment pulsacji prędkości (m^2/s^2).

Badania wykazały, że jedynie w pobliżu warstwy styku ($z = 0$) intensywność turbulencji przyjmuje duże wartości od 0,01 do 0,005 odpowiednio dla czasu od momentu styku poniżej 5 min, i 3 godziny. Większa burzliwość występuje od strony wody gorącej poniżej płaszczyzny $z = 0$, co jest zrozumiałe gdyż następuje przenikanie ciepła z wody ciepłej do wody chłodniejszej a także odzysk ciepła z blachy zbiornika przez wodę zimną.

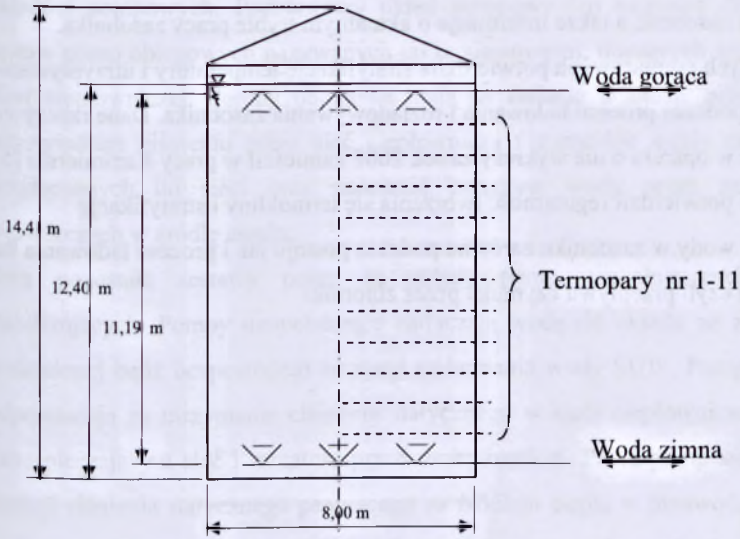
Zjawisko stratyfikacji opisuje Olszak w rozprawie doktorskiej [19]. Bazując na doświadczeniach Pieńkowskiego przeprowadził badania podczas sedimentacji zanieczyszczeń wody z miejskiej sieci ciepłowniczej w niezisolowanym zbiorniku stacji filtracyjnej. Opis matematyczny zjawiska nie został rozbudowany o nowe elementy w stosunku do prac Monina, Jagłom i Ellisona. Przedstawił natomiast wyniki szeregu eksperymentów, w których wykazał tworzenie się warstwy dyspersyjnej podczas wprowadzania wody gorącej do górnej części zbiornika. Pieńkowski w publikacji [22] analizował zjawisko tworzenia się warstwy dyspersyjnej w trakcie wprowadzania wody zimnej do dolnej części zbiornika.

Omawiane zjawisko stratyfikacji temperatury w zbiorniku wypełnionym wodą o różnej temperaturze w efekcie tworzenia się statecznej warstwy dyspersyjnej podczas procesu wprowadzania zimnej wody w dolnej części zbiornika jak i wody gorącej w górnej części zachodzi w zasobnikach ciepła.

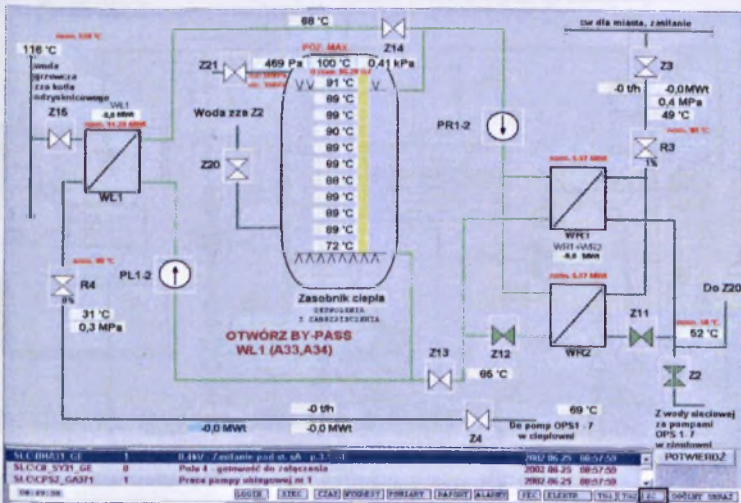
Badania własne autora pracy zostały wykonane na urządzeniu rzeczywistym tj. zasobniku ciepła pracującym w Przedsiębiorstwie Energetyki Ciepłej w Siedlcach.

Zbiornik jest w kształcie walca [41] o wielkości $D_w = 8,00$ m, $h_{brutto} = 14,407$ m licząc od poziomu terenu do najwyższego punktu dachu zbiornika. Na rys. 4.1 przedstawiono schemat konstrukcyjny zbiornika. Wysokość zwierciadła wody od poziomu dna zbiornika wynosi 12,40 m, ale wysokość pomiędzy osiami przewodów doprowadzających i odprowadzających wodę wynosi 11,19 m. Temperatura wody w zbiorniku mierzona jest w 13 punktach w tym w dwóch punktach na dachu.

Z punktu widzenia prowadzonego eksperymentu pomiary wykonywane są centralnie w 11 punktach poczynając 1,5 m od poziomu podłogi zbiornika, w odległościach, co 1 m.



Rysunek 3.18 Schemat konstrukcyjny zbiornika zasobnika ciepła w Siedlcach [42]
 Figure 3.18 Construction drawing of the thermal heat storage in Siedlce



Rysunek 3.19 Obraz synoptyczny zasobnika ciepła wraz z układem wymienników zasilająco-rozładowujących
 Figure 3.19 Synoptic screen of the thermal energy storage with load and unload heat exchanger units

Na rysunku 3,19 zamieszczono obraz synoptyczny. Poza pomiarami temperatury zostały prowadzone pomiary przepływu, ciśnienia i temperatury wody w przewodach zasilających zasobnik, a także informacje o aktualnym trybie pracy zasobnika.

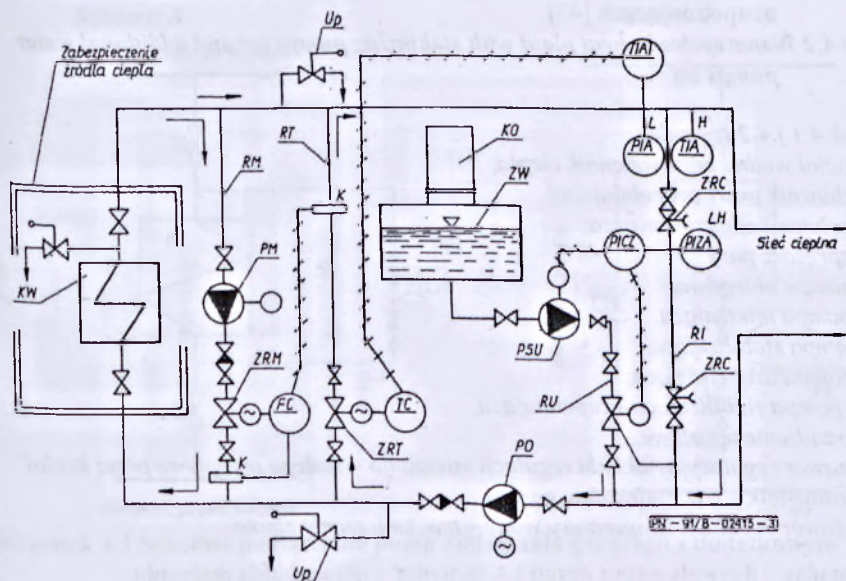
Analiza danych pomiarowych potwierdziła stratyfikację temperatury i utrzymywanie się termokliny podczas procesu ładowania i rozładowywania zasobnika. Dane rzeczywiste i opracowane w oparciu o nie wykresy za rok 2002 zamieścił w pracy Kazimierski [5].

Kazimierski potwierdził regularność tworzenia się termokliny i stratyfikację temperatury wody w zasobniku zarówno podczas postoju jak i procesu ładowania bądź rozładownia czyli przepływu czynnika przez zbiornik.

4. Obiegi wodne w źródłach ciepła

Obiegi hydrauliczne źródła ciepła wyposażone są w dwa lub większą liczbę układów pompowych. Podstawowy układ pompowy (co najmniej dwie pompy) to zestaw pomp obiegowych nazywanych także sieciowymi, tłoczących wodę powrotną z sieci ciepłowniczej. Pompy obiegowe mają za zadanie wymusić przepływ wody o odpowiednim ciśnieniu przez sieć ciepłowniczą i wszystkie węzły czyli odbiorców przyłączonych do sieci oraz zapewnić przepływ wody przez zespół urządzeń wytwórczych w źródle ciepła.

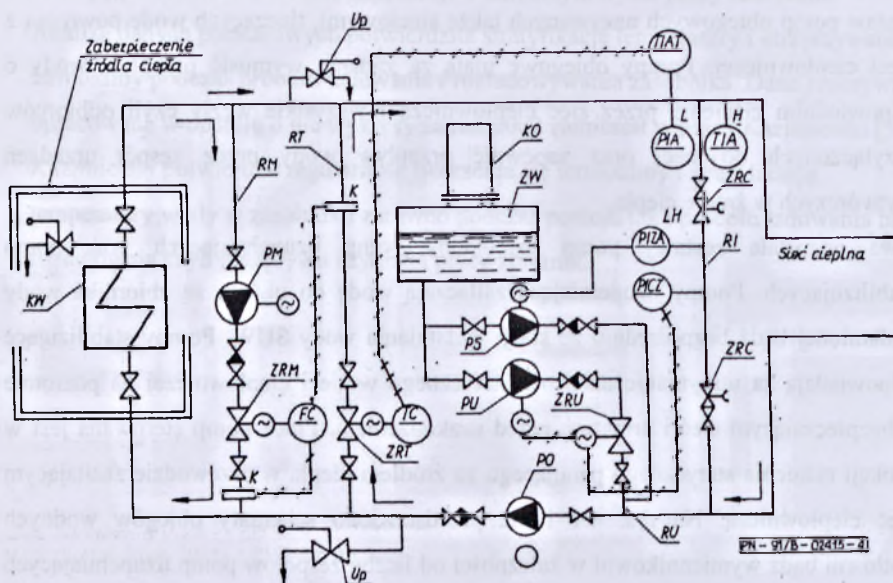
Dwa pozostałe zestawy pomp to układy pomp uzupełniających oraz pomp stabilizujących. Pompy uzupełniające zatłaczają wodę do układu ze zbiornika wody uzdatnionej bądź bezpośrednio ze stacji uzdatniania wody SUW. Pompy stabilizujące odpowiadają za utrzymanie ciśnienia statycznego w sieci ciepłowniczej na poziomie zabezpieczającym sieć i armaturę przed uszkodzeniem. Praca pomp sterowana jest w funkcji ciśnienia statycznego panującego za źródłem ciepła w przewodzie zasilającym sieć ciepłowniczą. Na rys. 4.1 i 4.2 przedstawiono schematy obiegu wodnych kotłowni bądź wymiennikowni w zależności od liczby zespołów pomp uzupełniających i pomp stabilizujących [43].



Rysunek 4.1 Obiegi wodne źródła ciepła z układem pomp stabilizująco-uzupełniających [43]

Figure 4.1 Water cycles in heat plant with stabilizing and additional water pumps in one set

Układ pomp uzupełniająco-stabilizujących oznacza, że ten sam zestaw pompowy realizuje dwa zadania: stabilizacji ciśnienia i uzupełniania wody sieciowej.



Rysunek 4.2 Obiegi wodne źródła ciepła z układem pomp stabilizujących i pomp uzupełniających [43]

Figure 4.2 Water cycles in heat plant with stabilizing pumps set and additional water pumps set

Rysunek 4.1 i 4.2 *legenda:*

KW - kocioł wodny lub wymiennik ciepła,

ZW - zbiornik wody uzupełniającej,

KO - kolumna odgazowywacza,

R - rozprężacz pary

PO - pompa obiegowa,

PM - pompa mieszająca,

PS - pompa stabilizująca,

PU - pompa uzupełniająca,

PSU - pompa stabilizująco-uzupełniająca,

Up - urządzenie upustowe,

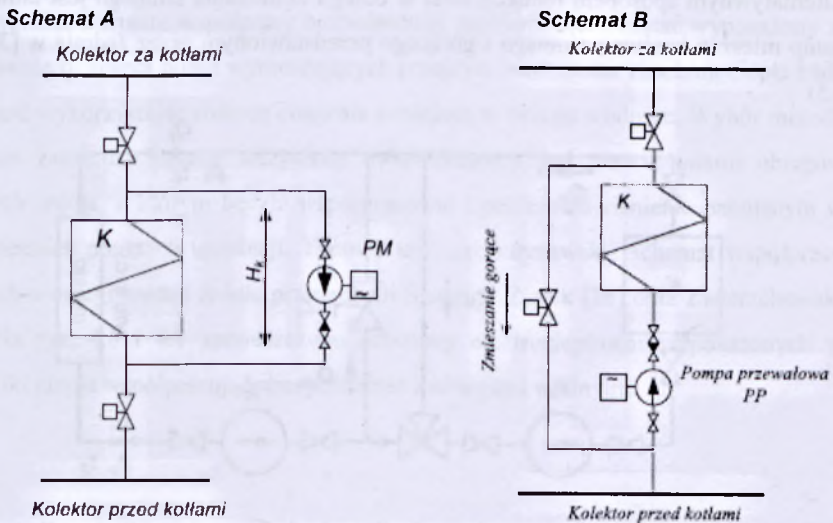
ZRM - zawór regulacyjny układu regulacji mieszania - stałego przepływu przez kocioł bądź wymiennik - tzw. mieszanie gorące,

ZRT - zawór regulacji temperatury wody - tzw. mieszanie zimne.

Układ tak dobranych i usytuowanych w obiegu wodnym zespołów pompowych skutkuje pracą pomp przy dużym stopniu dławienia, co oznacza znaczne straty energii elektrycznej. Misiewicz [15] zaproponował rozwiązanie efektywnej eksploatacji układów pomp poprzez wybranie jednego z trzech rozwiązań:

- układu z pompami sieciowo-kotłowymi, lub
- układu z pompami sieciowo-kotłowymi i sieciowymi, bądź
- układu z pompami sieciowymi i przewałowymi.

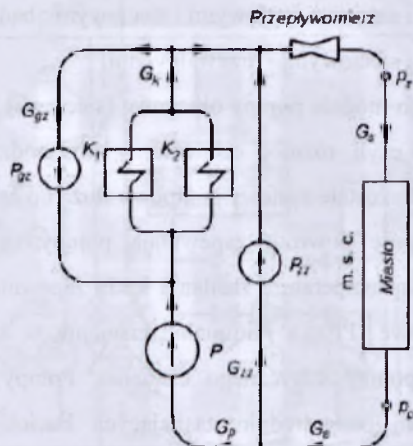
Niezależnie od wybranego modelu pompy obieguwe (sieciowe) zapewniają wymagane ciśnienie dyspozycyjne, czyli różnicę ciśnienia w przewodzie zasilającym sieć i przewodzie powrotnym. Pozostałe zestawy pompowe służą do zapewnienia parametrów technologicznych. Ciśnienie powrotu zapewniają pompy uzupełniające i pompy stabilizujące, odpowiednią temperaturę zasilania kotła zapewniają pompy mieszania gorącego bądź przewałowe (PP), a minimalne ciśnienie w źródle podczas stanów awaryjnych stabilizują pompy statycznego ciśnienia. Pompy przewałowe (PP) są zabudowywane w rurach bezpośrednio zasilających kocioł. PP pokonują opory hydrauliczne kotła oraz umożliwiają realizację mieszania gorącego (rys. 4.3).



Rysunek 4.3 Schemat podłączenie pomp mieszania gorącego z dodatkowym obiegiem chłodzącym – schemat A i pomp przewałowych – schemat B [15]

Figure 4.3 Scheme of connecting the pumps of hot mixing with the additional circulation cooling – fig. A and boiler pumps – fig. B

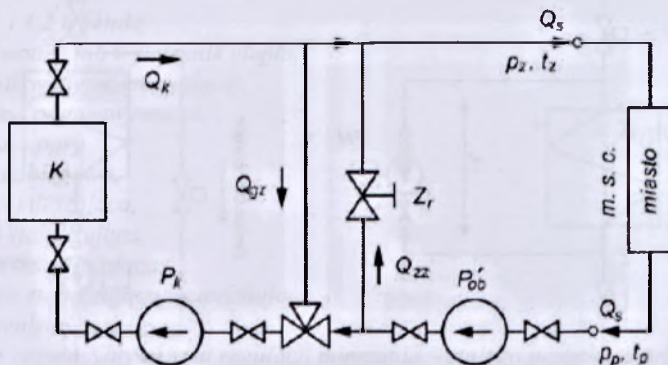
Kierunkiem modernizacji proponowanym przez Jędrala [3] jest dobór pomp mieszania gorącego i oddzielnych pomp mieszania zimnego o znacznie niższych wysokościach podnoszenia niż pompy obiegowe. Na rys. 4.4 zamieszczono schemat z pompami obiegowymi (sieciovym) P , pompa mieszania zimnego P_{zz} oraz pompami mieszania gorącego P_{gz} .



Rysunek 4.4 Schemat układu wody sieciowej ciepłowni [3]

Figure 4.4 Scheme of water cycle in power plant

Alternatywnym sposobem redukcji strat w obiegu mieszania zimnego jest eliminacja pomp mieszań zarówno zimnego i gorącego przedstawionym przez Jędrala w [3] (rys. 4.5).



Rysunek 4.5 Schemat obiegu wodnego kotłowni – inny wariant eliminacji strat dławienia w obiegu mieszania zimnego [3]

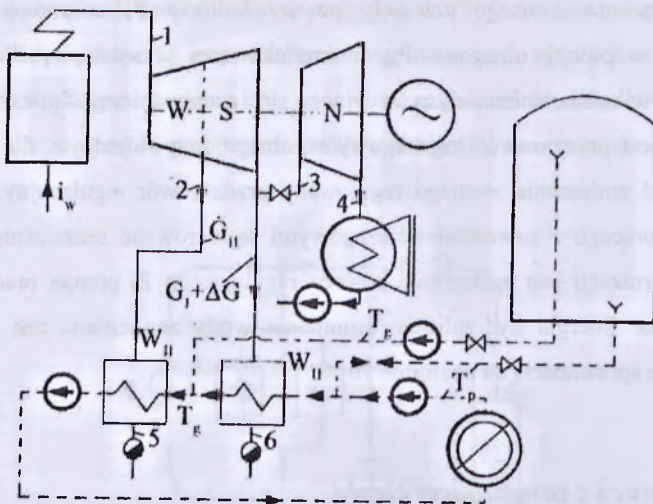
Figure 4.5 Scheme of water cycle in heat plant – another possibility of reduction stifle losses in cold mixing circulation

Pompy mieszania gorącego zastąpiły pompy kotłowe P_k a pompy obiegowe wymieniono na pompy obiegowe P_{ob} o zredukowanej wysokości podnoszenia do wymaganej wielkości ciśnienia dyspozycyjnego sieci ciepłowniczej. Mieszanie gorące realizowane jest przez zawór trójdrogowy w obiegu indywidualnym dla każdego z kotłów. Układ mieszania zimnego regulowany przez zawór regulacyjny Z_r i układ mieszania gorącego z zaworami trójdrogowymi są sterowane niezależnie. Dalszym etapem modernizacji jest zastąpienie zaworu regulującego Z_r pompą pracującą jako turbina wodna. Energia hydrauliczna strumienia wody zamieniana jest na energię elektryczną ze sprawnością na poziomie 70 %.

4.1. Współpraca z zasobnikiem ciepła

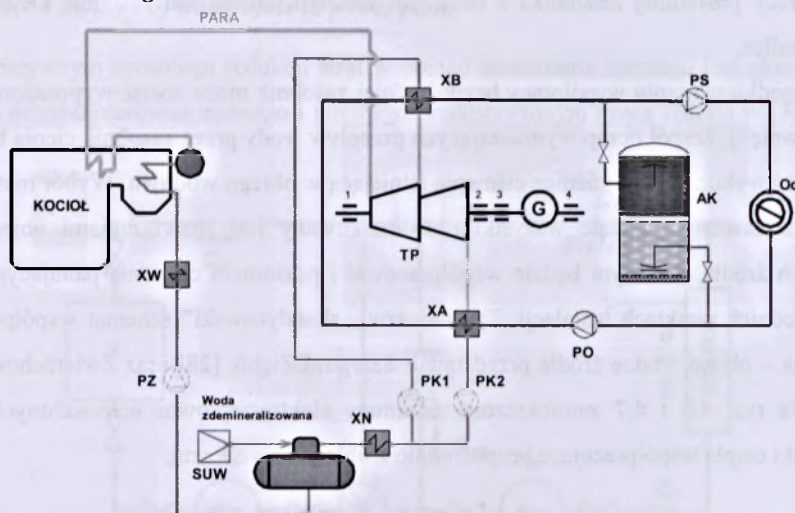
W układzie obiegu wodnego w źródle ciepła włączony został zasobnik ciepła. Wyróżnia się dwa podstawowe schematy zasilania (połączenia obiegów wodnych źródła i zasobnika): zasilanie bezpośrednio wodą z obiegów hydraulicznych źródła i pośrednie przez układ dwóch zespołów wymienników wody chłodnej i wody gorącej. Przykładem współpracy pośredniej zasobnika z obiegiem wodnym źródła jest zasobnik ciepła w PEC Siedlce.

W przypadku wariantu współpracy bezpośredniej zasobnik może zostać wyposażony w pompownię tj. zespół pomp wymuszających przepływ wody przez zasobnik ciepła bądź pracować wykorzystując różnicę ciśnienia istniejącą w obiegu wodnym. Wybór metody zasilania zasobnika przede wszystkim uwarunkowany jest rozwiązaniami obiegów wodnych źródła, z którym będzie współpracował i poziomem ciśnienia panującym w odpowiednich punktach instalacji. Typowy tzw. „skandynawski” schemat współpracy zasobnik – obiegi wodne źródła przedstawili Szargut i Ziębik [28] oraz Zwierzchowski [39]. Na rys. 4.6 i 4.7 zamieszczono schematy elektrociepłowni wyposażonych w zasobniki ciepła współpracujące bezpośrednio z obiegami wodnymi.



Rysunek 4.6 Uproszczony schemat obiegu wodnego elektrociepłowni z zasobnikiem[28]: *W,S,N*- część wysoko, średnio i niskoprężna turbiny, *W_I* – wymiennik ciepłowniczy podstawowy, *W_{II}* – wymiennik ciepłowniczy szczytowy

Figure 4.6 Simplified scheme of the water cycle in CHP plant with thermal energy storage

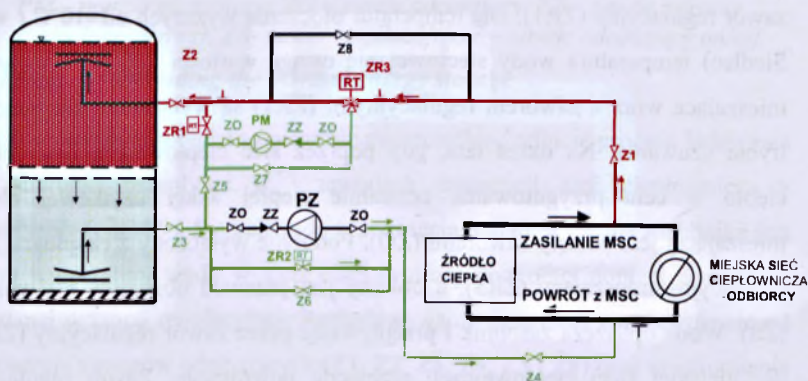


Rysunek 4.7 Sposób włączenia zasobnika ciepła w układ hydrauliczny elektrociepłowni bezpośrednio bez pompowni zasobnika [39]: *PS*- pompy sieciowe, *PO*-pompy obiegowe, *PK* – pompa kondensatu, *PZ* – pompy zasilające (przewalowe), *XA*, *XB* – wymienniki ciepłownicze, *XN*, *XW* – wymienniki regeneracyjne nisko i wysokociśnieniowy.[4]

Figure 4.7 Method of storage installation a thermal energy storage into hydraulic cycle in CHP plant without storage pumps set

Zasobnik włączony w sposób bezpośredni w układ obiegu wodnego źródła wymaga aby układ hydrauliczny był wyposażony w pompy obiegowe (PO) czyli tłoczące wodę w przewodzie powrotnym. Dolne dysze zasobnika znajdują się po stronie ssawnej pomp obiegowych (PO) a pompy sieciowe (PS) zlokalizowane są na przewodzie zasilającym sieć ciepłowniczą. W tym przypadku górne dysze zasobnika znajdują się po stronie ssawnej pomp sieciowych (PS). Pompy sieciowe (PS) i pompy obiegowe (PO) stosowane są jedynie w układach hydraulicznych elektrociepłowni konwencjonalnych tj. wyposażonych w turbiny parowe. W ciepłowniach stosowane są układy pompowe bez pomp sieciowych opisane w [3,15,43].

Popularnie stosowany układ podłączenia zasobnika do obiegu hydraulicznego źródła z zastosowaniem układu pomp zasobnika (PZ). Najprostszy jest układ z dwoma zespołami pomp obsługujących dysze górne i dysze dolne zasobnika. Jednak jest to nieefektywne rozwiązanie z perspektywy zarówno kosztów inwestycyjnych jak i eksploatacyjnych. Zalecanym przez Zwierchowskiego [39] jest układ z jednym zespołem pomp zasobnika współpracujący z zespołem pompy mieszającej i zaworami regulacyjnymi. Na schematach 4.8 i 4.9 przedstawiono proces ładowania i rozładowywania zasobnika.



Rysunek 4.8 Proces ładowania zasobnika [39]: PZ – pompa zasobnika, PM – pompa mieszająca, ZO – zawór odcinający, ZZ – zawór zwrotny (jednokierunkowy), ZR- zawór regulacyjny, Z – zawór odcinający on/off.

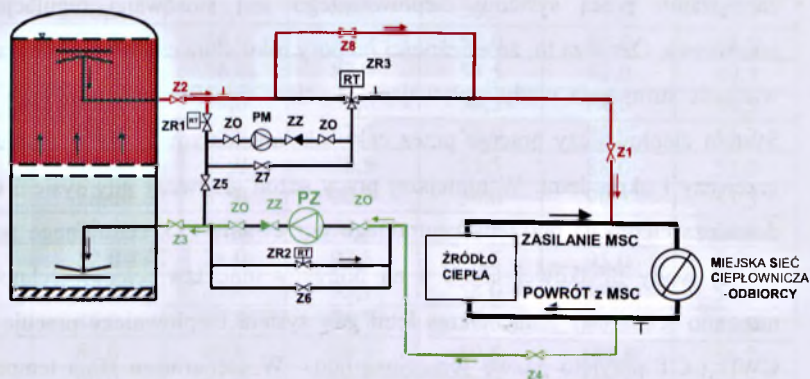
Figure 4.8 Process of loading the thermal energy storage

Proces ładowania zasobnika rozpoczyna się, gdy temperatura wody powrotnej w sieci ciepłowniczej osiągnie wartość wyższą od ustalonej temperatury wynikającej z procesu sterowania pracą systemu ciepłowniczego. Wzrost temperatury wody w przewodzie powrotnym sieci ciepłowniczej jest sygnałem do rozpoczęcia procesu ładowania zasobnika. Ładowanie zasobnika rozpoczyna się od otwarcia zaworów odcinających on/off Z1, Z2, Z3, Z4 i Z5. Różnica ciśnienia w przewodach sieci miejskiej zasilającym i powrotnym wymusza przepływ przez układ wodny zasobnika ciepła. W przypadku ładowania pompa zasobnika nie włącza się. Istotną rolę odgrywa zawór regulacyjny trójdrogowy, mieszający (ZR3). Jest to zawór mieszający strumień wody wpływający z sieci ciepłowniczej zasilającej ze strumieniem wody chłodnej wypływającej z zasobnika, tłoczonym przez pompę mieszającą. Pompa mieszająca i zawór regulacyjny ZR3 mieszający pracują wówczas, gdy temperatura wody w sieci ciepłowniczej przekracza 100 °C. Są sterowane w oparciu o pomiar temperatury wody dopływającej do zaworu mieszającego (ZR3). Ma to miejsce w okresie zimowym, gdy temperatura otoczenia, czyli powietrza zewnętrznego obniży się do poziomu w przypadku sieci w Siedlcach ok. -10°C. Program doboru temperatury wody w sieci ciepłowniczej przez układy pompowe w źródle ciepła nazywany jest krzywą regulacji, tabelą regulacyjną bądź wykresem regulacyjnym. Na rys. 4.10 przedstawiono krzywą regulacji dla systemu ciepłowniczego w Siedlcach, Żyrardowie i Karczewie.

Proces regulacji temperatury wody wpływającej do zasobnika dodatkowo kontroluje zawór regulacyjny (ZR1). Dla temperatur otoczenia wyższych od -10°C (w przypadku Siedlec) temperatura wody sieciowej nie osiąga wartości 100 °C a wówczas pompa mieszająca wraz z zaworem regulacyjnymi (ZR1) są wyłączone, ale pozostawione w trybie czuwania. Na okres lata, gdy poprzez sieć ciepłowniczą dystrybuowane jest ciepło w celu przygotowania centralnie ciepłej wody użytkowej obieg pompy mieszającej jest odcięty zaworami (ZO). Podobnie wyłączony z eksploatacji jest zawór regulacyjny mieszający (ZR3), a otwarty jest przewód obiegowy i zawór odcinający (Z8). Woda opuszcza zasobnik i przepływając przez zawór regulacyjny (ZR2) wpływa do miejskiej sieci ciepłowniczej, przewodu powrotnego. Zawór regulacyjny (ZR2) kontroluje, aby strumień wody wypływającej ze zbiornika odpowiadał strumieniowi wody wpływającej, tak, aby w zasobniku zwierciadło wody pozostało na stałym poziomie a przesunięciu ulegała jedynie warstwa dyspersyjna wody o różnych temperaturach zwana termokliną.

Proces ładowania trwa do momentu wzrostu temperatury w przewodzie powrotnym w MSC lub do momentu, gdy termoklina osiągnie poziom dyszy dolnej.

Pozostałe zawory umieszczone na rys. 4.9 to zawory zabezpieczające układ pompy mieszającej PM tj. ZZ zawór zwrotny (jednokierunkowy), dwa zawory odcinające (ZO) cały zestaw pompowy oraz zawór (Z7) na przewodzie obiegowym pompy. Analogicznie wyposażona jest pompa zasobnika (PZ). Zawór (Z6) zamyka przewód obiegowy tej pompy. Zawór regulacyjny (ZR3) jest także wyposażony w przewód obiegowy zamykany zaworem odcinającym (Z8).



Rysunek 4.9 Proces rozładowywania zasobnika [39]: PZ – pompa zasobnika, PM – pompa mieszająca, ZO – zawór odcinający, ZZ – zawór zwrotny (jednokierunkowy), ZR – zawór regulacyjny, Z – zawór odcinający on/off

Figure 4.9 Process of unloading the thermal energy storage

Proces rozładowywania zasobnika to pozornie zwierciadlane odbicie procesu ładowania odwracając kierunki przepływu w przewodach łączących sieć ciepłowniczą z zasobnikiem ciepła (rys. 4.9). Sygnałem do rozpoczęcia rozładowywania zasobnika jest obniżenie się temperatury wody w sieci ciepłowniczej powrotnej poniżej narzuconej wartości podanej w tabeli regulacyjnej. Rozładowywanie zasobnika rozpoczyna się od momentu otwarcia zaworów odcinających (Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 i Z8) oraz uruchomienia zestawu pompy zasobnika. Woda chłodna wpływająca poprzez dolną dyszę do zasobnika wypycha ku górze termoklinę a nad nią wodę gorącą, która poprzez dyszę górną opuszcza zasobnik. Pompa mieszająca i zawór (ZR3) nie biorą udziału w procesie rozładowywania, dlatego woda gorąca przepływa przez przewód obiegowy zaworu mieszającego co wymaga otwarcia zaworu odcinającego (Z8).

Proces trwa do momentu wzrostu temperatury wody z przewodzie powrotnym sieci ciepłowniczej bądź, gdy termoklina osiągnie poziom zwierciadła górnego a zatem temperatura wody opuszczającej zasobnik będzie na tym sam poziomie, co wpływającej do zbiornika.

N rys. 4.8 i 4.9 urządzenia biorące udział w procesie ładowania i rozładowywania oznaczone są kolorami: kolorem czerwonym – woda gorąca, kolorem zielonym – woda chłodna.

4.2. Regulacja pracy sieci ciepłowniczej

W rozdziale 4.1 odniesiono się do tabel regulacyjnych systemu ciepłowniczego. W zarządzaniu pracą systemu ciepłowniczego jest stosowana regulacja ilościowo-jakościowa. Oznacza to, że zależności od pory roku, dnia czy też godziny zmianie ulega wielkość strumienia wody wpływającej do sieci ciepłowniczej oraz jego temperatura. System ciepłowniczy pracuje przez cały rok kalendarzowy, ale w podziale na sezon grzewczy i okres letni. W niniejszej pracy sezon grzewczy gdy system ciepłowniczy dostarcza ciepło na potrzeby centralnego ogrzewania CO, centralnego przygotowanie ciepłej wody użytkowej CWU i na potrzeby inne tzw. ciepło technologiczne CT nazwano scenariusz zima. Okres letni gdy system ciepłowniczy pracuje na potrzeby CWU i CT przyjęto nazwę scenariusz lato. W scenariuszu zima temperatura wody opuszczającej obiegi wodne źródła i wpływającej do magistrali systemu ciepłowniczego jest uzależniona od średniej temperatury powietrza zewnętrznego. W tabeli 1 przedstawiono temperatury wody zasilającej miejski system ciepłowniczy (zasilanie) i wody powracającej do źródła z miejskiego systemu ciepłowniczego (powrót). Schłodzenie tj. różnica temperatury wody zasilającej i powrotnej), jakiemu ulega woda jest wynikiem pracy urządzeń czyli wymienników ciepła w węzłach ciepłowniczych odbiorców. Tabela regulacyjna ustalana jest indywidualnie w oparciu o dane eksploatacyjne z lat ubiegłych przez każdy system ciepłowniczy. Poniżej zamieszczono przykładowe trzy tabele regulacyjne dla systemów ciepłowniczych w Siedlcach, Żyrardowie i Karczewie. Pogrubiono temperaturę powietrza zewnętrznego, dla której woda w sieci zasilającej w każdym z przytoczonych przykładów regulacji sieci ciepłowniczej przekracza 100°C.

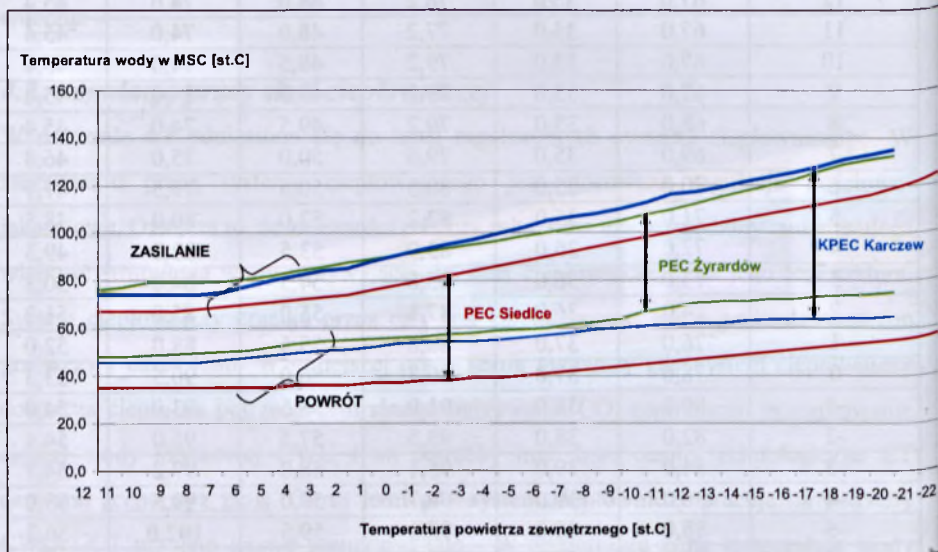
Tabela 4.1 Tabele regulacyjne wybranych systemów ciepłowniczych

Table 4.1 Regulating tables of chosen heating systems

Temperatura zewnętrzna	PEC w Siedlcach		PEC Żyrardów		KPEC w Karczewie	
	Zasilanie	Powrót	Zasilanie	Powrót	Zasilanie	Powrót
°C	°C	°C]	°C	°C	°C	°C
12	67,0	35,0	76,2	48,0	74,0	45,4
11	67,0	35,0	77,2	48,0	74,0	45,4
10	67,0	35,0	79,2	48,5	74,0	45,4
9	67,0	35,0	79,2	49,0	74,0	45,4
8	68,0	35,0	79,2	49,5	74,0	45,4
7	69,0	35,0	79,6	50,0	75,0	46,4
6	70,0	35,0	80,5	50,5	77,5	47,7
5	71,0	35,0	82,2	52,0	80,0	48,5
4	72,0	26,0	83,9	53,5	82,0	49,3
3	73,0	36,0	85,6	54,5	84,0	50,3
2	74,0	36,0	87,3	55,0	85,0	51,2
1	76,0	37,0	88,8	55,5	88,0	52,0
0	78,0	37,0	90,3	56,0	90,5	53,3
-1	80,0	38,0	91,9	56,5	93,0	54,0
-2	82,0	38,0	93,5	57,5	95,0	54,4
-3	84,0	39,0	95,1	58,0	97,2	54,7
-4	86,0	39,0	96,7	59,0	99,5	55,0
-5	88,0	40,0	98,3	59,5	102,0	56,2
-6	90,0	41,0	99,9	60,0	104,8	57,1
-7	92,0	42,0	101,5	61,3	106,5	57,8
-8	94,0	43,0	103,1	62,5	108,0	59,5
-9	96,0	44,0	105,2	63,8	110,0	60,1
-10	98,0	45,0	107,3	66,8	112,5	60,8
-11	100,0	46,0	109,7	68,3	115,8	61,5
-12	102,0	47,0	112,1	70,5	117,0	62,1
-13	10,0	48,0	114,8	70,8	119,0	62,2
-14	106,0	49,0	117,4	70,8	121,5	63,0
-15	108,0	50,0	120,1	71,8	123,5	63,5
-16	110,0	51,0	122,7	72,0	125,5	63,5
-17	112,0	52,0	125,9	73,0	128,0	63,6
-18	114,0	53,0	129,0	73,3	130,8	63,8
-19	116,0	54,0	130,8	74,0	133,0	64,0
-20	119,0	55,0	132,5	75,0	135,0	65,0
-21	122,0	56,0	-	-	-	-
-22	125,0	57,0	-	-	-	-

Uwaga: **Zasilanie** ozn. Temperatura wody zasilającej Miejski System Ciepłowniczy,
Powrót ozn. Temperatura wody powracającej z Miejskiego Systemu Ciepłowniczego,
 obie temperatury są mierzone w punkcie rozliczeniowym na granicy źródła ciepła tj.
 obiegi wodnej w źródle z siecią ciepłowniczą.

Rys. 4.10 ilustruje przebiegi zmian temperatury wody w systemach ciepłowniczych w okresie trwania sezonu grzewczego. Zwyczajowo przyjęto, że sezon trwa do momentu, gdy średnia temperatura powietrza zewnętrznego nie przekroczy $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$. W praktyce wyłączenie wymienników centralnego ogrzewania z eksploatacji odbywa się na żądanie odbiorcy.



Rysunek 4.10 Wykresy regulacyjne wybranych systemów ciepłowniczych
Figure 4.10 Regulation diagrams for chosen district heating systems

Każdy system ciepłowniczy pracuje w oparciu o dedykowany wykres regulacyjny. W praktyce oznacza to, że system w Karczewie pracuje w oparciu o temperaturę wody sieciowej wyższą od systemu Siedlce o blisko 7 do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. W efekcie powoduje to większe straty ciepła przez sieć ciepłowniczą. Krzywe regulacji wody zasilającej dla sieci karczewskiej i żyrdowskiej są bardzo zbliżone natomiast temperatury wody tzw. powrotu w sieci w Żyrdowie są wyższe od ok. 3 do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ niż w Karczewie. Może być to spowodowane zbyt małym schłodzeniem w węzłach ciepłowniczych co stanowi dodatkowe źródła strat ciepła w obszarze dystrybucji.

W okresie poza sezonem grzewczym (scenariusz lato) ciepło dystrybuowane przez sieć ciepłowniczą zasila węzły tylko wyposażone w wymienniki CWU bądź CT, ale tylko w przypadku, gdy ciepło technologiczne jest użytkowane w ciągu przerwy pomiędzy sezonami grzewczymi np. przez chłodziarki absorpcyjne bądź inne urządzenia technologiczne w strefie przemysłowej.

W scenariuszu lato temperatura wody zasilającej i powrotnej jest stała i jest zbliżona do poziomu temperatur, jakie osiągała woda sieciowa dla +12 st. C w scenariuszu zima. W systemach ciepłowniczych temperatury zasilania i powrotu kształtują się następująco: dla Siedlec wynosi 67/35°C, dla Żyrardowa 72/45°C a dla Karczewa 74/45 °C.

W każdym ze scenariuszy w okresie doby zaobserwowano wahania strumienia wody przepływającej przez sieć ciepłowniczą. Rozbieżności te są spowodowane pracą układów sterowania pomp obiegowych, które za pomocą falowników zwiększają bądź redukują prędkości obrotowe pomp. Praca ta jest odpowiedzią źródła na zwiększone zapotrzebowanie na ciepło w okresie porannym i popołudniowo-wieczornym związanym z użytkowaniem przez mieszkańców ciepłej wody. W okresie sezonu grzewczego wahania dobowe strumienia wody są odpowiedzią na zmienne warunki atmosferyczne i zmienne zużycie Ciepłej wody przez mieszkańców.

W pracy [12] Mańkowski i Kwestarz omówili analizę nierównomierności rozbioru ciepła przez sieć ciepłowniczą w Siedlcach budując reprezentatywny przebieg tygodniowych obciążeń cieplnych dla okresu letniego.

Na potrzeby opracowania [12] przyjęto, że okres letni obejmuje następujące miesiące: maj, czerwiec, lipiec, sierpień, wrzesień i październik korzystając z bazy danych Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej w Siedlcach za rok 1999 oraz 2000. Wymienione miesiące pogrupowano w pary, a następnie uśredniając wartości wskazań godzinowych mocy dla sieci wygenerowano przykładowe tygodniowe obciążenia sieci ciepłowniczej. Zatem z ok. 26 tygodni przypadających na trzy pary miesięcy otrzymano:

- „Umowny” tydzień majowo-czerwcowy obrazujący przebieg obciążeń w okresie letnim w roku 1999 i 2000,
- „Umowny” tydzień lipcowo-sierpniowy – charakterystyczny dla okresu wakacyjnego roku 1999 i 2000 oraz
- ‘Umowny” tydzień wrześnieowo-październikowy – obrazujący okres jesienny wraz z płynnym przejściem w sezon grzewczy w roku 1999 i 2000.

Obok uśrednionych obciążeń cieplnych systemu ciepłowniczego analizowano także zużycie energii w ciągu 24 h (doby) oraz współczynnik niejednoczesności rozbioru (ozn. K_h) zdefiniowany jako stosunek mocy maksymalnej jaka wystąpiła w ciągu doby do wartości średniej.

Tabele 4.2, 4.3 i 4.4 przedstawiają otrzymane wyniki.

Tabela 4.2 Uśrednione dane z tygodni maja i czerwca

Table 4.2 Average data for weeks of May and June

maj-czerwiec 1999				maj-czerwiec 2000		
dzień	moc	energia	K _h	moc	energia	K _h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	15,620	1349,569	1,096	10,697	924,211	1,045
wt.	15,502	1339,371	1,083	10,704	924,785	1,132
sr.	14,595	1261,044	1,053	11,351	980,768	1,112
czw.	15,811	1366,097	1,196	11,180	965,976	1,087
pt.	15,358	1326,967	1,128	11,543	997,353	1,170
sob.	16,100	1391,045	1,126	11,590	1001,349	1,146
nd.	16,213	1400,777	1,072	11,323	978,274	1,077
ŚREDNIA	15,600	1347,839	1,213	11,198	967,531	1,206

Tabela 4.3 Uśrednione dane z tygodni lipca i sierpnia

Table 4.3 Average data for weeks of July and August

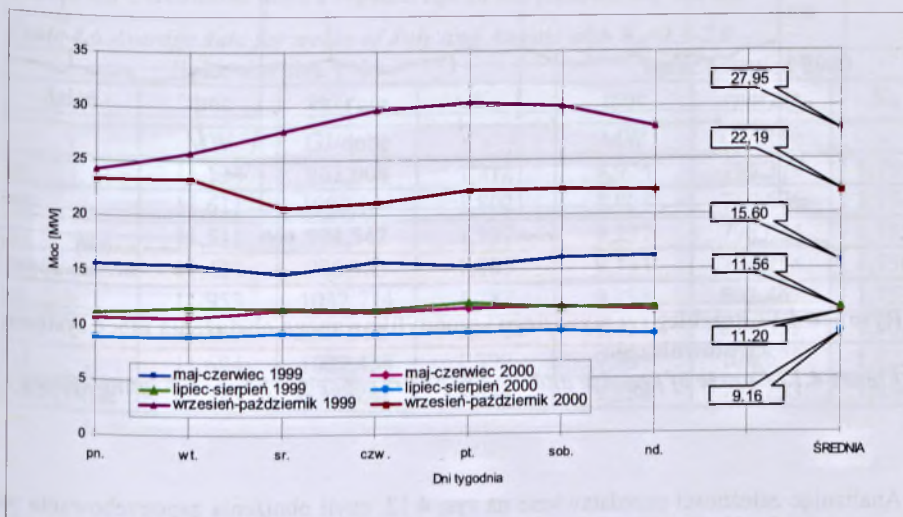
lipiec-sierpień 1999				lipiec-sierpień 2000		
dzień	moc	energia	K _h	moc	energia	K _h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	11,134	962,008	1,048	8,974	775,379	1,062
wt.	11,611	1003,164	1,205	8,908	769,676	1,071
sr.	11,511	994,542	1,077	9,237	798,034	1,070
czw.	11,423	986,983	1,032	9,193	794,256	1,057
pt.	11,953	1032,714	1,078	9,288	802,462	1,076
sob.	11,567	999,368	1,075	9,425	814,339	1,071
nd.	11,684	1009,458	1,058	9,081	784,625	1,078
ŚREDNIA	11,555	998,320	1,211	9,158	791,253	1,102

Tabela 4.4 Uśrednione dane z tygodni września i października

Table 4.4 Average data for weeks of September and October

wrzesień-październik 1999				wrzesień-październik 2000		
dzień	moc	energia	K _h	moc	energia	K _h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	24,252	2095,383	1,134	23,342	2016,745	1,175
wt.	25,698	2220,284	1,089	23,335	2016,144	1,234
sr.	27,746	2397,226	1,056	20,687	1787,336	1,159
czw.	29,654	2562,104	1,193	21,136	1826,116	1,161
pt.	30,294	2617,363	1,102	22,225	1920,236	1,118
sob.	29,980	2590,248	1,107	22,321	1928,496	1,123
nd.	28,014	2420,406	1,123	22,306	1927,239	1,152
ŚREDNIA	27,948	2414,716	1,265	22,193	1917,473	1,298

Na rys. 4.11 zilustrowano zmiany obciążenia cieplnego systemu dla reprezentatywnych przebiegów.

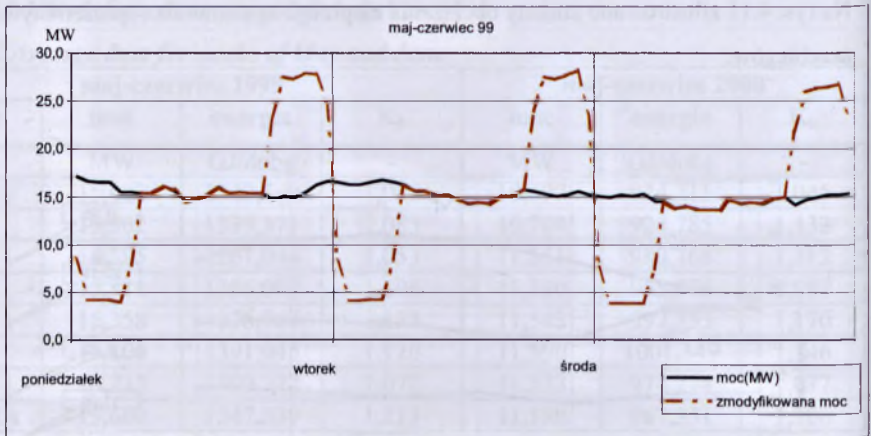


Rysunek 4.11 Średnie, dobowe obciążenia cieplne systemu ciepłowniczego w latach 1999-2000

Figure 4.11 Average, daily power capacity of district heating system in 1999-2000

W dalszej części pracy założono, że w efekcie prowadzonych prac modernizacyjnych sieci ciepłowniczey i węzłów, wartość współczynnika niejednoczesności rozbioru ciepłej wody użytkowej K_h wzroście z poziomu 1,1-1,3 do 1,8-2,0. Przy utrzymanym na stałym poziomie średniego zapotrzebowania na moc, wzrostowi K_h będzie towarzyszyć wzrost wartości maksymalnego oraz zmniejszy się wartość minimalnego zapotrzebowania na moc.

Przykładowy przebieg zmian rzeczywistych i prognozowanych obciążeń cieplnych systemu przedstawia rys. 4.12.



Rysunek 4.12 Przebieg rzeczywistego i zmodyfikowanego obciążenia mocą systemu ciepłowniczego

Figure 4.12 Course of practice and modify power capacity of district heating system

Analizując zależności przedstawione na rys. 4.12, czyli obniżenia zapotrzebowania na moc w godzinach rannych i znacznego wzrostu podczas szczytu popołudniowo-wieczornego zmodyfikowano uśrednione przebiegi tygodniowe. Wyniki zamieszczono w kolejnych tabelach 4.5, 4.6 i 4.7.

Tabela 4.5 Uśrednione dane z tygodni maja i czerwca dla $K_h=1,8-2,0$

Table 4.5 Average data for weeks of May and June with $K_h=1,8-2,0$

dzień	maj-czerwiec 1999			maj-czerwiec 2000		
	moc	energia	K_h	moc	energia	K_h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	15,620	1349,569	1,787	10,697	924,211	1,754
wt.	15,502	1339,371	1,820	10,704	924,785	1,859
sr.	14,595	1261,044	1,830	11,351	980,768	1,835
czw.	15,811	1366,097	1,841	11,180	965,976	1,835
pt.	15,358	1326,967	1,862	11,543	997,353	1,872
sob.	16,100	1391,045	1,908	11,590	1001,349	1,849
nd.	16,213	1400,777	1,870	11,323	978,274	1,786
ŚREDNIA	15,600	1347,839	1,969	11,198	967,531	1,930

Tabela 4.6 Uśrednione dane z tygodni lipca i sierpnia dla $K_h=1,8-2,0$

Table 4.6 Average data for weeks of July and August with $K_h=1,8-2,0$

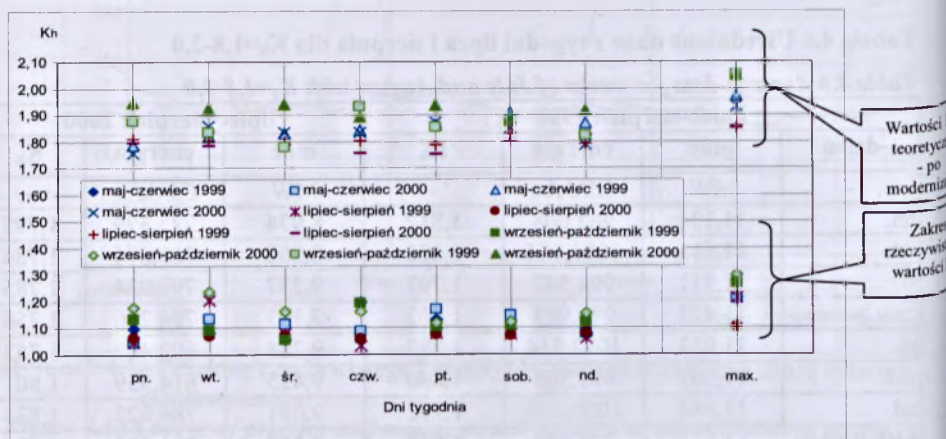
lipiec-sierpień 1999				lipiec-sierpień 2000		
dzień	moc	energia	K_h	moc	energia	K_h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	11,134	962,008	1,812	8,974	775,379	1,795
wt.	11,611	1003,164	1,802	8,908	769,676	1,784
sr.	11,511	994,542	1,797	9,237	798,034	1,785
czw.	11,423	986,983	1,803	9,193	794,256	1,756
pt.	11,953	1032,714	1,787	9,288	802,462	1,753
sob.	11,567	999,368	1,830	9,425	814,339	1,801
nd.	11,684	1009,458	1,792	9,081	784,625	1,823
SREDNIA	11,555	998,320	1,848	9,158	791,253	1,854

Tabela 4.7 Uśrednione dane z tygodni września i października dla $K_h=1,8-2,0$

Table 4.7 Average data for weeks of September and October with $K_h=1,8-2,0$

wrzesień-październik 1999				wrzesień-październik 2000		
dzień	moc	energia	K_h	moc	energia	K_h
-	MW	GJ/dobę	-	MW	GJ/dobę	-
pn.	24,252	2095,383	1,875	23,342	2016,745	1,949
wt.	25,698	2220,284	1,835	23,335	2016,144	1,925
sr.	27,746	2397,226	1,780	20,687	1787,336	1,941
czw.	29,654	2562,104	1,932	21,136	1826,116	1,894
pt.	30,294	2617,363	1,852	22,225	1920,236	1,935
sob.	29,980	2590,248	1,871	22,321	1928,496	1,884
nd.	28,014	2420,406	1,824	22,306	1927,239	1,916
SREDNIA	27,948	2414,716	2,050	22,193	1917,473	2,050

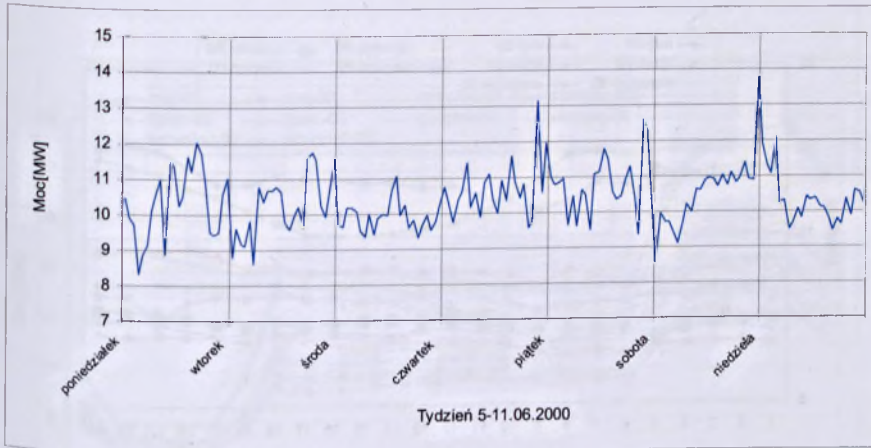
Na rys. 4.13 zilustrowano rozrzut wartości współczynnika niejednoczesności rozbioru cwu dla reprezentatywnych tygodni.



Rysunek 4.13 Teoretyczne i rzeczywiste wartości współczynnika K_h dla reprezentatywnych przebiegów obciążeń sytemu ciepłowniczego
Figure 4.13 Theoretical and practice value of K_h factor for representative power capacity of district heating system course

Bazując na tym samym zakresie danych, jak w przypadku reprezentatywnych charakterystyk przebiegu obciążeń tygodniowych, sporządzono typowy przebieg obciążeń godzinowych w ciągu doby. Z uwagi na fakt rozbieżności w charakterze ilości oraz godzin poboru ciepłej wody użytkowej pomiędzy sobotą i niedzielą a pozostałymi dniami "roboczymi" czyli: poniedziałkiem a piątkiem wprowadzono podział na dni robocze i weekendowe.

Na rys. 4.14 przedstawiono charakterystykę rzeczywistego przebiegu obciążeń tygodniowych.

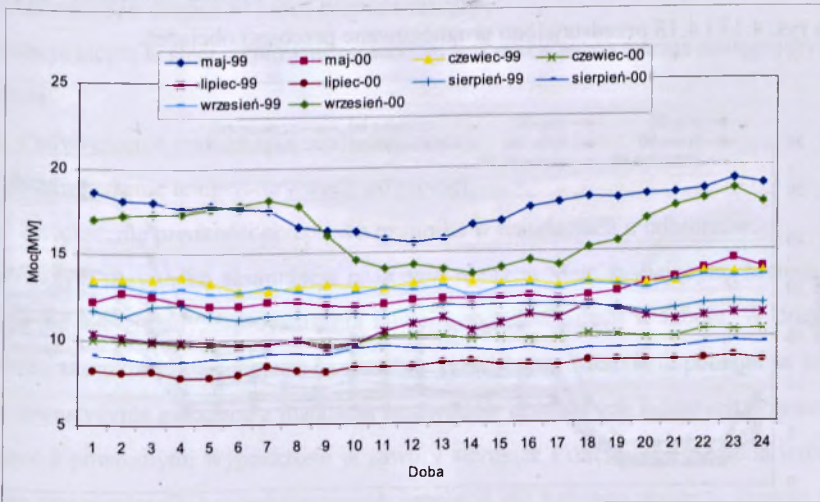


Rysunek 4.14 Wybrany przebieg obciążeń miejskiej sieci ciepłowniczej dla tygodnia 5-11.06.2000

Figure 4.14 Selected operating load of the district heating system for week 5-11.06.2000

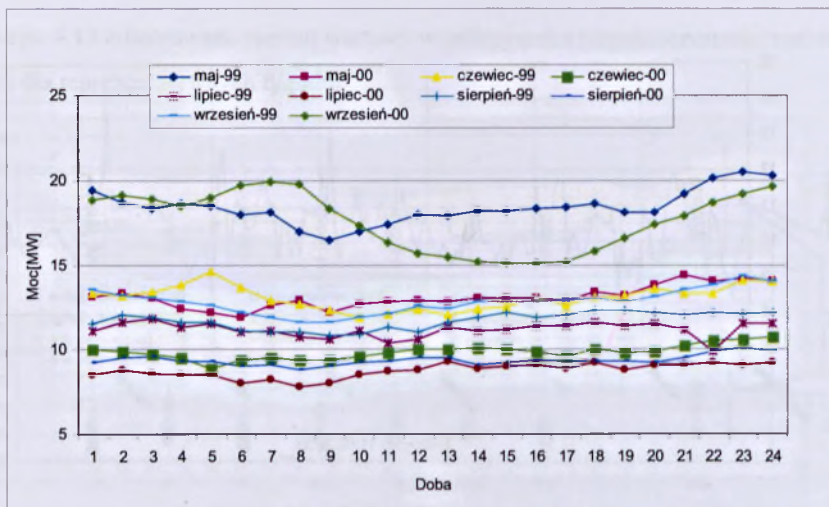
Uśrednione przebiegi godzinowe tworzą bazę danych uwzględniając miesiąc i dzień tygodnia.

Kolejne rys. 4.15 i 4.16 ilustrują omawianą analizę przebiegów dobowych.



Rysunek 4.15 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni roboczych, przy $K_h=1,2$

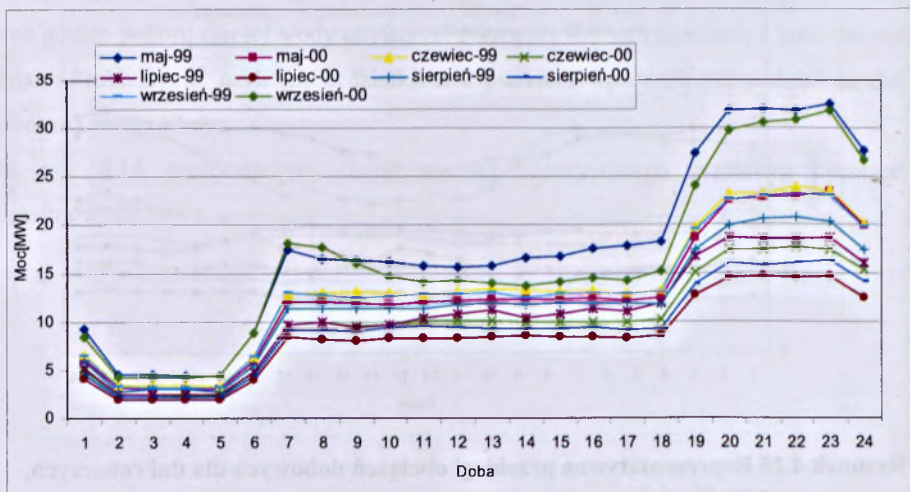
Figure 4.15 Representative daily power capacity profile of district heating system for working days with factor $K_h=1,2$



Rysunek 4.16 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni wolnych od pracy, przy $K_h=1,2$

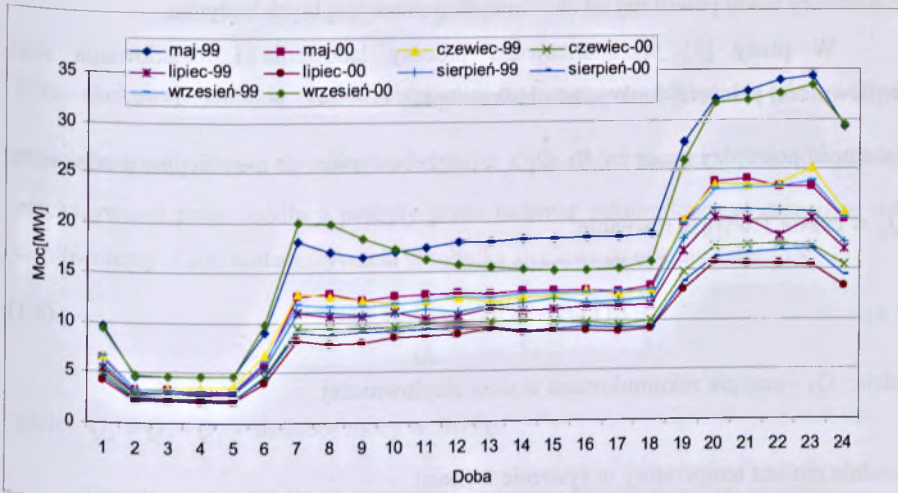
Figure 4.16 Representative daily power capacity profile of district heating system for weekend days with factor $K_h=1,2$

Zgodnie z założeniem wzrostu współczynnika niejednoczesności K_h od wartości 1,2 do wartości 1,8-2,0 podobnie jak charakterystyki reprezentatywne, tygodniowe przebiegi dobowe zostały skorygowane o współczynniki obciążeń dobowych. Na rys. 4.17 i 4.18 przedstawiono prognozowane przebiegi obciążeń.



Rysunek 4.17 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni roboczych, przy $K_h=1,8-2,0$

Figure 4.17 Representative daily power capacity profile of district heating system for working days with factor $K_h=1,8-2,0$



Rysunek 4.18 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni wolnych od pracy, przy $K_h=1,8-2,0$

Figure 4.18 Representative daily power capacity profile of district heating system for weekend days with factor $K_h=1,8-2,0$

4.3 Akumulacja ciepła w sieci ciepłowniczej

Akumulacja ciepła w sieci ciepłowniczej wodnej jest realizowana trzema następującymi metodami:

1. Podwyższenie temperatury wody zasilającej,
2. Podwyższenie temperatury wody powrotnej,
3. Zwiększenie prędkości przepływu czynnika w instalacjach u odbiorców.

W pierwszym przypadku akumulacja następuje w przewodzie zasilającym. Metoda ta wymaga jedynie zmiany, wprowadzenia nowej krzywej regulacji w źródle. W drugim przypadku akumulacja następuje w przewodzie powrotnym. Metoda ta pociąga za sobą koszty inwestycyjne związane z instalacją przewodów upustowych łączących przewody zasilające z powrotnymi wyposażone w zawory sterujące i odcinające. Metoda trzecia wymaga wprowadzenia nowych krzywych regulacji dla każdego węzła – dlatego też jest rzadko stosowana.

Do najistotniejszych wad procesu akumulacji ciepła w systemie należy zaliczyć wzrost strat ciepła oraz podniesienie kosztów pompowania. Dla przypadku drugiego, gdzie podnoszona jest temperatura wody powrotnej występuje zmienna pojemność cieplna,

charakterystyczna dla sezonu grzewczego. Zjawisko to jest efektem zależności temperatury wody powrotnej od chwilowych potrzeb cieplnych budynku.

W pracy [9] przeanalizowano procesy ładowania i rozładowania sieci ciepłowniczej pełniące funkcję zasobnika ciepła.

Zależność pomiędzy mocą źródła \dot{Q}_1 a zapotrzebowaniem na moc cieplną u odbiorców \dot{Q}_2 w czasie T wyraża równanie:

$$\int_0^T \dot{Q}_1(\tau) d\tau - \int_0^T \dot{Q}_2(\tau) d\tau = Q_a \quad (4.1)$$

gdzie: Q_a – energia zakumulowana w sieci ciepłowniczej.

Średnia zmiana temperatury w systemie wynosi:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2}{mc_p} \quad (4.2)$$

gdzie: θ – średnia temperatura czynnika w sieci,

m – masa wody w sieci ciepłowniczej,

c_p – ciepło właściwe wody,

$\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2$ - różnica pomiędzy mocą źródła a zapotrzebowaniem na moc u odbiorców.

Minimalny czas ładowania sieci $\Delta\tau$ można wyrazić w postaci zależności:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\theta}{\frac{d\theta}{d\tau}} \quad (4.3)$$

gdzie: $\Delta\theta$ - jednostkowy przyrost temperatury wody.

Przy spełnieniu następujących założeń:

- straty energii cieplnej są równe zero,
- sieć ma odpowiednią przepustowość zapewniającą teoretyczną prędkość ładowania,
- źródło zapewnia wymaganą dostawę energii.

Energia zakumulowana w sieci w czasie $\Delta\tau$ wynosi:

$$Q_a = mc_p \Delta\theta \quad (4.4)$$

Przy skokowej zmianie zapotrzebowania na moc u odbiorców do wartości przewyższającej moc aktualną w źródle (ozn. \dot{Q}_2^+) nastąpi niedobór energii przekazywanej przez źródło a pokryty przez nadmiar zakumulowanej energii w sieci ciepłowniczej. Czas rozładowywania zasobnika sieciowego opisuje zależność:

$$\Delta\tau_r = \frac{Q_a}{\dot{Q}_b} \quad (4.5)$$

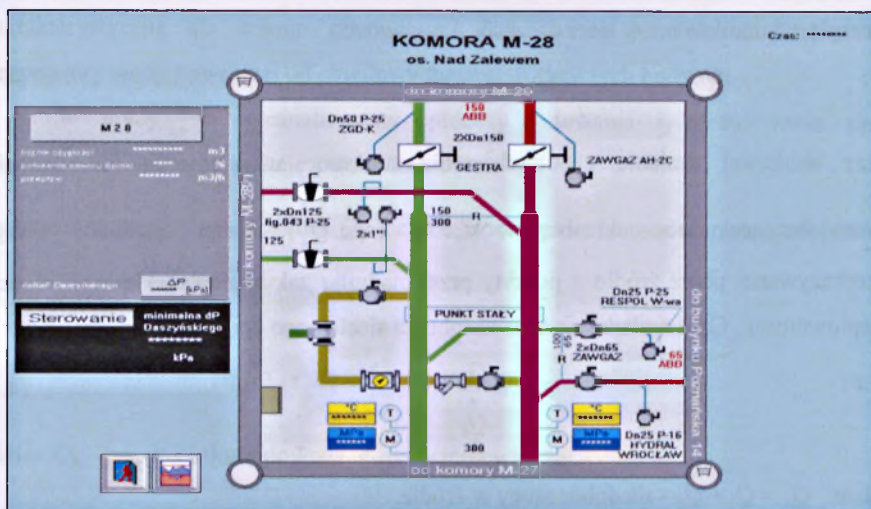
gdzie: $\dot{Q}_b = \dot{Q}_2^+ - \dot{Q}_1$ - niedobór mocy w źródle.

Chwilowa moc źródła \dot{Q}_1 narzucona jest przez krzywą regulacji systemu ciepłowniczego, uzależnioną od temperatury zewnętrznej.

Praktyczne aspekty i efekty ekonomiczne opisał Borkowski w pracy [2]. W sieci ciepłowniczej miasta Siedlce prowadzono doświadczenia w zakresie eksploatacji sieci z wykorzystaniem jej części, jako zasobnika ciepła.

W jednej z komór ciepłowniczych (M28) na sieci o średnicy nominalnej DN 300 mm wykonano połączenie przewodu zasilającego z powrotnym w celu umożliwienia wykorzystania sieci ciepłowniczej, jako zasobnika ciepła [1]. Na rys. 4.19 zamieszczono obraz synoptyczny z systemu monitoringu sieci, komory M28 gdzie znajduje się przewód spinający sieć zasilającą z powrotną.

Na przewodzie łączącym przewód sieci zasilającej z siecią powrotną zamontowano zawór sterowany poprzez system monitoringu. Rozwiązanie takie pozwala podnosić temperaturę powrotu wody sieciowej do źródła bez konieczności podnoszenia temperatury zasilania. Przy założeniach, że temperatura powrotu wzrasta o 10 °C.



Rysunek 4.19 Obraz synoptyczny komory ciepłowniczej M28 [1]
Figure 4.19 Synoptic screen District heating cell M28

Część sieci ciepłowniczej stanowi zasobnik ciepła pracujący równolegle z zasobnikiem ciepła zainstalowanym w źródle ciepła w siedleckim systemie ciepłowniczym. Przy podwyższeniu temperatury powrotu wody sieciowej o ok. 10 K, wzrost strat ciepła związany z podwyższeniem temperatury w wybranych odcinkach sieci kształtuje się na poziomie 300 GJ /miesięcznie, co stanowi wzrost o ponad 26% dla sieci powrotnej magazynującej ciepło. Magazynowanie ciepła w sieci było stosowane przy jednoczesnej współpracy sieci z zasobnikiem ciepła w źródle, którego pojemność podczas eksploatacji okazała się zbyt mała.

Zasobnik poziomy „sietciowy” jest, zatem niskonakładową inwestycyjnie formą rozbudowy już istniejącego zasobnika ciepła w źródle. Powiększenie pojemności cieplnej otworzyło możliwości zwiększenia zysków z produkcji energii elektrycznej przez układ skojarzony zamontowany w źródle ciepła. Drugim istotnym parametrem jest ograniczenie liczby rozruchów kotłów węglowych w okresach przejściowych, co wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa i redukcję emisji zanieczyszczeń.

4.4 Praca zasobnika ciepła

Odrębnym zagadnieniem jest zarządzanie pracą zasobnika. W praktyce proces ładowania i rozładowywania zasobnika ciepła w polskich systemach ciepłowniczych odbywa się w oparciu o sterowanie ręczne. Praktycznie zasobnik ciepła traktowany jest jako dodatkowe źródło ciepła w okresie szczytowego zapotrzebowania na ciepło. W okresie zredukowanych odbiorów ciepła np. w nocy bądź w godzinach okołopołudniowych w tygodniu zasobnik jest ładowany a zatem traktowany jako odbiorca ciepła.

Zasobnik umiejscowiony przy źródle ciepła pracuje, zatem jak szybkodypozycyjne źródło ciepła bądź jako odbiorca ciepła na życzenie dyspozytora ruchu sieci. W praktyce umożliwi to realizację jednego z trzech zadań stawianych przed zasobnikami.

Wariant I Stabilizację obciążenia cieplnego sieci w okresie letnim tj. zapotrzebowania na ciepło na potrzeby centralnego przygotowania wody użytkowej lub centralnego wytwarzania chłodu tzw. ciepło technologiczne. Zasobnik ciepła pracuje wówczas jak zbiornik buforowy stabilizując wydajność źródła ciepła na średniodobowym obciążeniu mocą cieplną. Taki zasobnik nosi nazwę zasobnika o pełnej akumulacyjności [11].

Wariant II Maksymalizację zysków z produkcji energii elektrycznej w układzie skojarzonym w okresie największych cen rynkowych energii bądź w okresie zakontraktowanym przez dyspozycję mocy elektrociepłowni [13].

Produkcja energii elektrycznej w skojarzeniu jest gratyfikowana świadectwem pochodzenia wysokosprawnej kogeneracji gdy w tym samym czasie wyprodukowane zostało ciepło na cele użytkowe. Magazynowanie ciepła w zasobniku w okresie produkcji energii elektrycznej spełnia ten warunek gdyż w ciągu doby zostanie dostarczone do odbiorców za pośrednictwem sieci ciepłowniczej. Zatem krótkotrwała praca układu skojarzonego np. w ciągu 8 godzin spowoduje naładowanie zasobnika, który rozładowując się będzie zasiliał sieć ciepłowniczą w pozostałym okresie tj. podczas postoju układu kogeneracyjnego.

Warint III Praca zasobnika ciepła w małym systemie ciepłowniczym, co oznacza, że w okresie letnim zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania CWU kształtuje się na poziomie 1- 2 MW. Odpowiedniej wielkości tj. pojemności cieplnej zasobnik zasila system ciepłowniczy w okresie letnim podczas weekendu. Oznacza to, że źródło ciepła jest wyłączane na koniec pracy II zmiany w piątek a I zmiana w poniedziałek ponownie je włącza. Zasobnik w tym okresie automatycznie się rozładowuje zaspakajając zapotrzebowanie na ciepło w systemie ciepłowniczym.

Wymienione warianty stanowią kryteria doboru pojemności cieplnej zasobnika, czyli jego pojemności wodnej i geometrii. Są natomiast istotne przy doborze algorytmu ładowania i rozładowania zasobnika. Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto algorytm godzinowy w układzie dobowym. Oznaczono momenty włączenia/wyłączenia odpowiednio procesów ładowania, rozładowania bądź akumulacji jako wskazanie zegara 24 godzinnego.

Inne kryteria zastosowano dla zasobników tzw. rozproszonych, czyli włączonych do obiegów wodnych systemu ciepłowniczego w pewnej odległości od źródła. Pod pojęciem zasobnik rozproszony przyjęto zasobnik o pełnej akumulacyjności uśredniający zapotrzebowanie na ciepło odbiorców zasilanych z sieci ciepłowniczej i położonych w sąsiedztwie zasobnika, podłączony bezpośrednio z układem pomp zasobnika i mieszających (rys. 4.8 i 4.9). Praca zasobnika rozproszonego jest zautomatyzowana. Sterowanie jest realizowane w funkcji temperatury wody powrotnej w miejskiej sieci ciepłowniczej. Spadek temperatury wody powrotnej w miejskiej sieci ciepłowniczej, który utrzymuje się bądź narasta jest sygnałem do rozładowania zasobnika, natomiast wzrost temperatury to sygnał do rozpoczęcia ładowania. Brak zmian temperatury wody powrotnej to czas gdy zasobnik jest w stanie oczekiwania.

5. Pojemność centralnego zasobnika ciepła

5.1. Metoda wyznaczania pojemności centralnego zasobnika ciepła

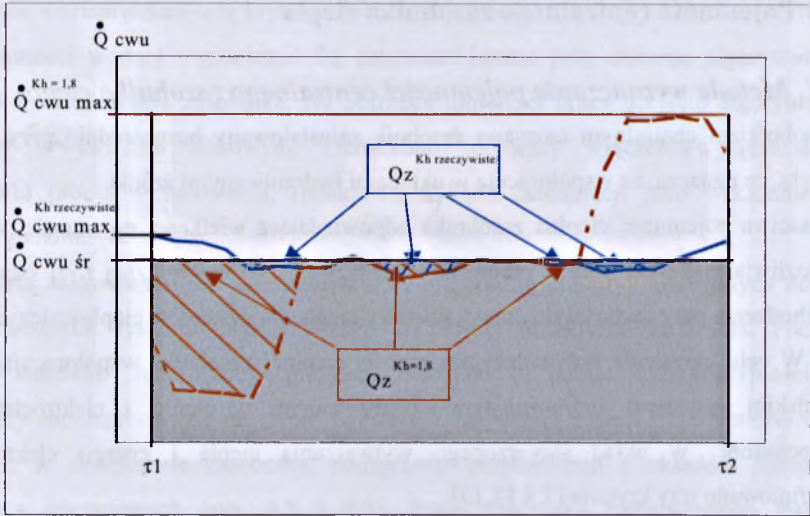
Zasobnikiem centralnym nazwano zasobnik zainstalowany bezpośrednio przy źródle ciepła, co oznacza, że współpracuje w układami hydraulicznymi źródła.

Właściwa pojemność cieplna zasobnika odpowiadająca wielkości pojemności wodnej umożliwia maksymalizację zysków ze sprzedaży energii elektrycznej i jej świadczeń pochodzenia przy zachowaniu ciągłej dostawy ciepła dla systemów ciepłowniczych.

W celu określenia optymalnej pojemności cieplnej zasobnika współpracującego z miejskim systemem ciepłowniczym zaopatrywanym w ciepło z elektrociepłowni wyposażonej w układ skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej zdefiniowano trzy kryteria [7,8,12,13].

- **KRYTERIUM I** - Zasobnik o pełnej akumulacyjności cieplnej ($\varphi = 1$) stabilizujący pracę źródła

Kryterium I zakłada dobór zasobnika o pojemności cieplnej pozwalającej na pracę ciągłą źródła z mocą odpowiadającą przykładowo średniemu zapotrzebowaniu przez odbiorców ciepła z sieci na przygotowanie wody użytkowej. Zasobnik o pełnej akumulacyjności pozwala na konfigurację źródła o mniejszej mocy od maksymalnego zapotrzebowania. Efektem są mniejsze koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne wynikające z możliwości pracy źródła ze stałą wysoką sprawnością. Na rys. 5.1 przedstawiono przebieg zmian obciążenia cieplnego sieci w funkcji współczynnika niejednoczesności rozbioru ciepłej wody użytkowej ozn. K_h . Naszkicowano przypadek, gdy współczynnik jest niski na poziomie 1,3 charakteryzujący rozległe systemy ciepłownicze oraz gdy K_h wyrasta do poziomu 1,8 do 2. Pojemność cieplną zasobnika ozn. Q_z opisuje zakresowany obszar pod krzywą K_h . Kryterium to zakłada ciągłą pracę źródła obciążonego mocą odpowiadającą wartości Q_{cwu}^* (kolor jasno-szary), natomiast pojemność cieplna zasobnika umożliwia zakumulowanie energii przewyższającej aktualne potrzeby odbiorców w czasie τ_1 - τ_2 .



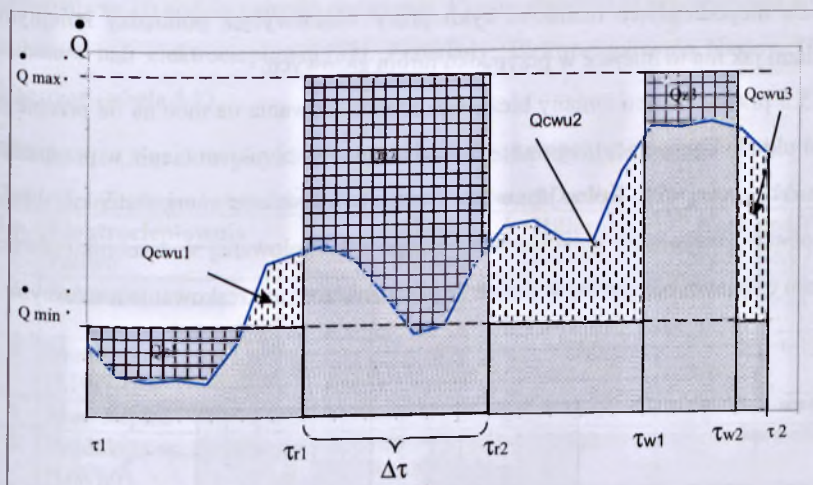
Rysunek 5.1 Pojemność cieplna zasobnika na tle zmian bieżącego zapotrzebowania na moc w funkcji wartości K_h [12,13]
Figure 5.1 Thermal energy storage capacity compared to actual fluctuation of power demand in district heating system with factor K_h

- **KRYTERIUM II** - Priorytet produkcji energii elektrycznej

Kryterium II uwzględnia wpływ struktury godzinowej taryf dla energii elektrycznej, na czas pracy układu kogeneracyjnego. Istotną rolę odgrywa podział na grupy taryfowe, grupy przyłączeniowe oraz strefy czasowe rozliczeń sprzedaży energii elektrycznej dla producentów. Zazwyczaj wyróżnia się trzy strefy czasowe tj. szczyt przedpołudniowy i szczyt popołudniowy z największymi cenami jednostkowymi zakupu energii elektrycznej oraz tzw. pozostałe godziny z ceną jednostkową minimalną. Maksymalizując zysk z produkcji energii elektrycznej w godzinach szczytu (rys. 5.2) ($\tau_{r1}-\tau_{r2}$ – przedpołudniowym; $\tau_{w1}-\tau_{w2}$ -popołudniowym) źródło obciążone jest mocą maksymalną równą nominalnej ozn. Q_{max} . W pozostałych godzinach układ produkcji skojarzonej obciążany jest mocą Q_{min} , która zapewnia możliwość rozładowania zasobnika. Zależność tą zilustrowano na rys. 5.6. Bilans układu źródła - zasobnik - odbiorcy w okresie czasu $\tau_0-\tau_1$ opisuje następująca zależność:

$$Q_{cwu1} + Q_{cwu2} + Q_{cwu3} = Q_{z1} + Q_{z2} + Q_{z3} \quad (5.1)$$

Pojemność cieplna zasobnika określana jest jako różnica sumy produkcji energii cieplnej w okresach czasu oznaczonych mianem szczytowych oraz w „godzinach pozostałych” a zużyciem energii cieplnej przez odbiorców.



Rysunek 5.2 Zmiana bieżącego zapotrzebowania na moc u odbiorców na tle produkcji energii cieplnej w układzie skojarzonym [12,13]

Figure 5.2 Permutation actual heat power demand comparing to electricity production in CHP

Na rys. 5.2 polem jasno-szarym oznaczono produkcję energii cieplnej z uwzględnieniem zmian obciążenia źródła w przedziałach czasu wyznaczonych przez zróżnicowanie cen energii elektrycznej.

Pole szare „kratkowane” oznacza energię magazynowaną w zasobniku, natomiast obszary białe kreskowane obrazują potrzeby odbiorców zaspakajane poprzez rozładowywanie zasobnika.

Pojemność cieplna zasobnika wyznaczana zgodnie z kryterium III opisuje zależność:

$$V_z^{III} = f(Q_{en,el}^{max}, \tau, \Delta\tau) \quad (5.2)$$

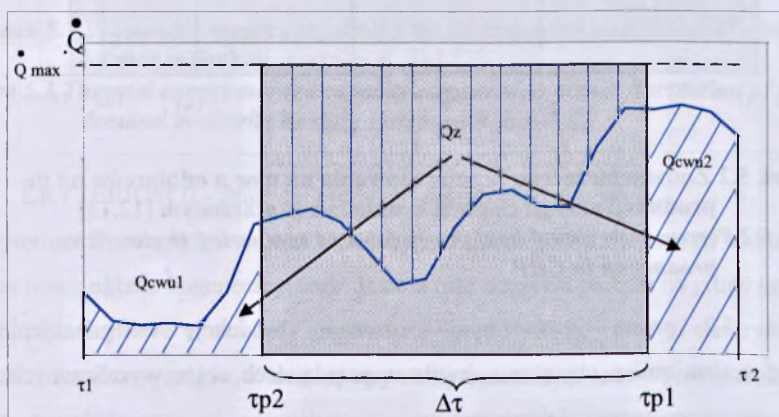
- KRYTERIUM III - Minimalizacja kosztów obsługi

Kryterium III zakłada wyłączenie z pracy źródła czyli układu kogeneracyjnego na czas $\Delta\tau$ w ciągu badanego okresu τ_1 - τ_2 (rys. 5.3). Przerwa w pracy źródła energii ma na celu obniżenie kosztów eksploatacji. W praktyce okres postoju układu skojarzonego obejmuje:

- zmianę nocną $\Delta\tau_{\min} = 8 \text{ h}$ czyli ($\Delta\tau_{\min} < (\tau_1 - \tau_2)$), bądź
- dwa dni wolne od pracy : sobotę i niedzielę, wówczas $(\tau_1 - \tau_2) < \Delta\tau_{\max}$.

Postój w pracy układu kogeneracyjnego jest możliwy, gdy są to silniki gazowe bądź urządzenia niepodlegające reżimowi cykli pracy włącz/wyłącz pomiędzy kolejnymi przeglądami jak ma to miejsce w przypadku turbin gazowych.

Na rys. 5.3 przedstawiono zmiany bieżącego zapotrzebowania na moc na tle przebiegu obciążeń układu kogeneracyjnego współpracującego z zasobnikiem ciepła w przypadku przerwy $\Delta\tau_{\min} < (\tau_1 - \tau_2)$. Kolor jasno-szary oznacza produkcję energii cieplnej przez źródło, obszar kreskowany pionowo ilość energii zakumulowanej w zasobniku równej potrzebom cieplnym odbiorców w czasie $\Delta\tau_{\min}$ oznaczonym kreskowaniem ukośnym.



Rysunek 5.3 Zmiany bieżącego zapotrzebowania na moc na tle przebiegu obciążeń układu kogeneracyjnego współpracującego z zasobnikiem ciepła [12,13]

Figure 5.3 Permutation actual heat power demand comparing to CHP unit load co-operating with thermal energy storage

W pracy analizowano wpływ zasobnika ciepła na parametry pracy sieci ciepłowniczej. Wykorzystywany do obliczeń symulacyjnych symulator nie analizował wpływu pojemności cieplnej zasobnika ciepła na parametry pracy sieci ciepłowniczej a miejsce jego lokalizacji. Nie mniej pojemność wodna a tym samym pojemność cieplna zasobnika jest istotnym zagadnieniem na etapie podejmowania decyzji inwestycyjnej rozbudowy sieci o zasobnik ciepła a także w późniejszym procesie zarządzania pracą sieci ciepłowniczej.

Obliczenia w celu uzyskania wpływu pojemności zasobnika na parametry pracy źródła ciepła można wykonać licencjonowanym oprogramowaniem EnergyPro firmy duńskiej EMD (Energi- og Miljodata). Przykład zaprezentowano w rozdziale 5.2.

Częstym rozwiązaniem stosowanym np. w Danii jest dzienna akumulacja ciepła, obliczana na 10 godzin pełnego obciążenia. Często zbiorniki te przewyższają wielkością kubaturę hali elektrociepłowni.[32]. Przykłady: Elektrociepłownia Haslev, Hilleroed, Naestved (tabela 5.1).

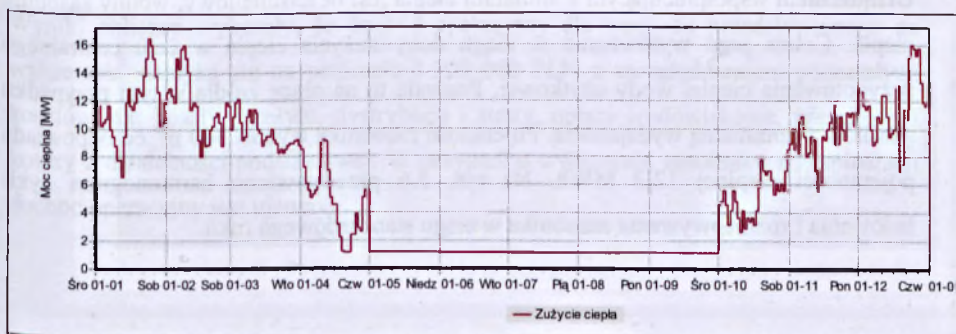
Tabela 5.1 Charakterystyki techniczne elektrociepłowni duńskich

Table 5.1 Technical characteristics/specifications of Danish CHP power plants

Lp.	Elektrociepłownia	Haslev	Hilleroed	Naestved/Fasan
1	Paliwo	Słoma	Gaz ziemny	Gaz ziemny / śmieci
2	Jednostka	Kotły parowe /turbiny	Turbina gazowa i kocioł parowy /turbina	Turbina gazowa i kocioł parowy /turbina
3	Moc elektryczna [MW]	5	77,6	25 + 13
4	Moc cieplna [MJ/s]	13	75,6	Brak danych
5	Produkcja en. elektrycznej [GWh/r]	17	300	Brak danych
6	Produkcja ciepła [GWh/r]	Brak danych	370	Brak danych
7	Sprawność całkowita [%]	86	87	90
8	Sprawność elektryczna [%]	16	44	40
9	Zasobnik [m ³]	3 500	16 000	6 000

5.2. Studium przypadku

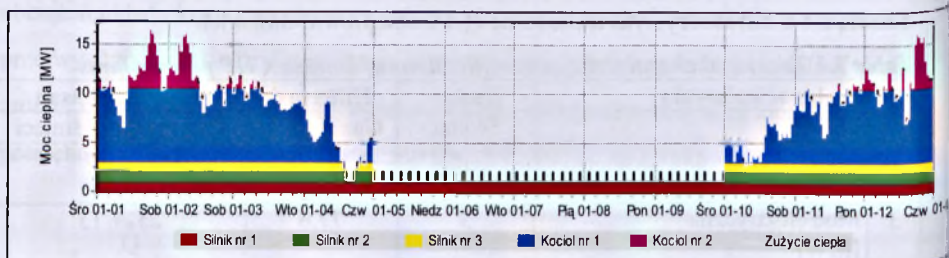
Profil sprzedaży ciepła a tym samym zużycia przez obiekty podłączone do systemu ciepłowniczego w obszarze miasta Dobry Przykład przedstawiono na rys.5.4.



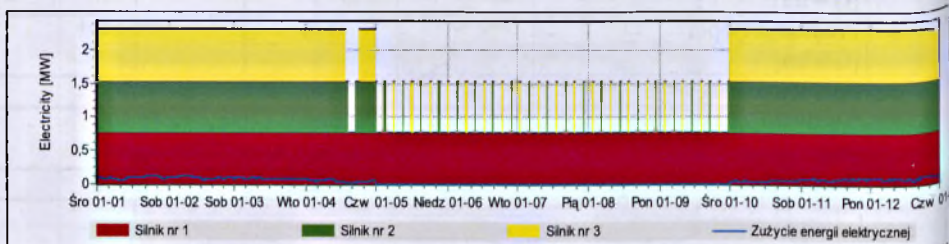
Rysunek 5.4 Zużycie ciepła w systemie „Dobry Przykład” – symulacja programem EnergyPro

Figure 5.4 Heat consumption in a district heating system „Good example” – simulation by EnergyPro

Źródłem ciepła jest elektrociepłownia wyposażona w trzy silniki gazowe spalające gaz sieciowy GZ 50 o mocy elektrycznej 0,77 MWee i 1,01 MWth ciepłej każdy. Zapotrzebowanie na ciepło w okresie sezonu grzewczego pokrywają dodatkowo dwa kotły węglowe o mocy 7,5MW każdy spalający węgiel kamienny. Na rys. 5.5a i 5.5b przedstawiono harmonogram pracy poszczególnych jednostek wytwórczych.

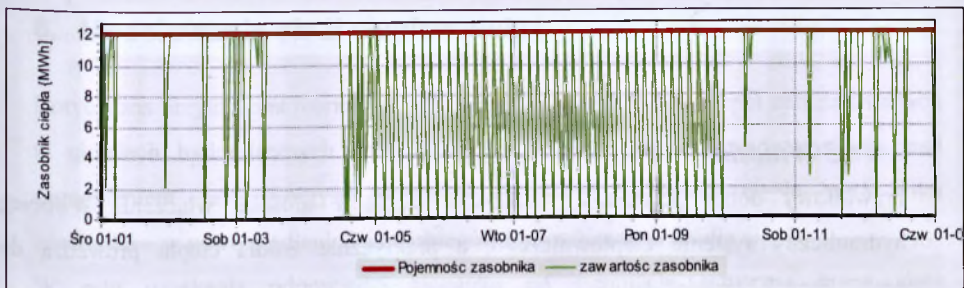


Rysunek 5.5a Roczna produkcja ciepła - symulacja programem EnergyPro
Figure 5.5a Yearly heat production – simulation by EnergyPro



Rysunek 5.5b. Roczna produkcja energii elektrycznej- symulacja programem EnergyPro
Figure 5.5b. Yearly electricity production – simulation by EnergyPro

Urządzeniem współpracującym z silnikami ciepła jest beciśnieniowy, wodny zasobnik ciepła. Celem jego wyrównanie w ciągu doby zużycia ciepła w celu centralnego przygotowania ciepłej wody użytkowej. Pozwala to na pracę źródła w tym przypadku silników z nominalną wydajnością. Pojemność zasobnika wynosi 300 m³ co odpowiada pojemności cieplnej 12,2 MWh. Na rys. 5.6 przedstawiono harmonogram cykli ładowania i rozładowywania zasobnika w ciągu standardowego roku.



Rysunek 5.6 Harmonogram cykli ładowania i rozładowywania zasobnika ciepła
Figure 5.6 Loading and unloading periods of the thermal energy storage

Tak scharakteryzowany system ciepłowniczy poddano symulacji komputerowej programem EnergyPro obliczając dla standardowego roku wynik finansowy netto.

Do analizy ekonomicznej przyjęto następujące dane:

- Węgiel kamienny:

Wartość opałowa 22,5 kJ/kg,
 Sprawność kotłów węglowych spalających węgiel kamienny 85%
 Cena 400 PLN/Mg

- Gaz ziemny GZ 50

Wartość opałowa 35,9 MJ/Nm³,
 Sprawność silników 86%
 Cena 1,15 PLN/Nm³

- Cena sprzedaży

Energia elektryczna 260 PLN/MWh (wraz ze świadectwem pochodzenia)
 Ciepło 106 PLN/MWh

Wyniki obliczeń wykazały, że dochód operacyjny dla wariantu przedstawionego na wykresach zamyka się na poziomie 1 300 000 PLN z uwzględnieniem pozostałych kosztów jak: koszty przesyłu, dystrybucji i straty, opłaty środowiskowe, przychody i koszty z działalności podstawowej. W przypadku wyłączenia zasobnika z eksploatacji dochód operacyjny jest ujemny.

5.3 Wnioski

Prawidłowy dobór pojemności zasobnika ciepła i sposobu włączenia w obieg hydrauliczny systemu ciepłowniczego, a praktycznie źródła ciepła prowadzą do następujących korzyści.

1. Pokrywanie szczytowego zapotrzebowania na ciepło bez włączania dodatkowych jednostek wytwórczych, co oznacza minimalizację czasu pracy kotłów szczytowych;
2. Pracę źródła ciepła ze stałym obciążeniem, co gwarantuje utrzymywanie stałej, wysokiej sprawności wytwarzania;
3. Ograniczenie zużycia paliwa, redukcję emisji zanieczyszczeń jako efekt pracy urządzeń wytwórczych na stałym poziomie z wysoką sprawnością;
4. Dla układów skojarzonych ciągły czas pracy z generowaniem świadectw pochodzenia, ponieważ produkowane ciepło jest przez cały czas jest ciepłem użytkowym;
5. Przy spełnieniu kryterium II – pojemność zasobnika umożliwi maksymalizację zysków ze sprzedaży energii elektrycznej po najwyższej cenie;
6. W przypadku włączenia zasobników bezpośrednio do układu hydraulicznego sieci powrotnej ciśnienie wynikające z wysokości zwierciadła wody jest jednocześnie ciśnieniem stabilizującym sieć powrotną, oczywiście przy zachowaniu odpowiedniego ukształtowania terenu i wysokości zasobnika ciepła;
7. Bezpośrednie podłączenie zasobnika redukuje straty wody w sieci, ponieważ zasobnik przy odpowiednim zapasie pojemności oraz montażu dyszy górnej może pracować jako naczynie zbiorcze dla objętości wody znajdującej się w sieci ciepłowniczej.

6. Modelowanie sieci ciepłowniczej

Dotychczas przytoczona teoria i przykłady dotyczą zasobników ciepła zainstalowanych w układach hydraulicznych źródeł ciepła. Nadal pozostaje otwarta dyskusja nad zagadnieniem, jakie korzyści przyniesie instalacja zasobnika ciepła bądź kilku zasobników w pewnej odległości od obiegów hydraulicznych źródła ciepła.

W celu uzyskania odpowiedzi sięgnięto po symulację statyczną pracy sieci ciepłowniczej wykorzystującą modele matematyczne elementów sieci.

6.1 Modelowanie systemu ciepłowniczego

Model matematyczny systemu to układ równań, który w określony sposób i z określoną dokładnością odwzorowuje system rzeczywisty [20]. Model ujmuje tylko część rzeczywistości, jest pozbawiony wielu szczegółów i cech nieistotnych z punktu widzenia celów modelowania. Model matematyczny jest oczywiście uproszczeniem systemu rzeczywistego, ponieważ zawiera tylko te aspekty systemu, które odpowiadają wymaganiom stawianym modelowi. Budowanie modelu matematycznego polega na określeniu odpowiednich zmiennych a potem sformułowaniu równań, które te zmienne spełniają. Osiąga się to używając znanych praw fizyki takich jak prawo zachowania masy, momentu i energii oraz określonych równań uzupełniających.

Podstawowe celem, dla których budowane są modele jest wykorzystanie ich do symulacji i badania zachowania się układów w różnych warunkach pracy; przy różnych parametrach pracy źródła tj. zasilania sieci ciepłowniczej i odbiorców, czyli węzłów ciepłowniczych.

6.1.1 Opis matematyczny sieci ciepłowniczej

Sieć ciepłowniczą o skomplikowanej strukturze należy przedstawić w postaci grafu tj. obiektu matematycznego składającego się z zbioru węzłów i zbioru krawędzi łączących pary węzłów [20,21,22]. Węzeł związane w krawędzią nazywamy węzłami końcowymi krawędzi a stopniem węzła liczbę incydentnych z nią krawędzi z pętłami liczonymi podwójnie.

Jeżeli krawędzie będą miały określone kierunki tj. wyznaczone węzły początkowe i węzły końcowe incydentne dla krawędzi to nosi nazwę krawędzi skierowanych zwanej dalej łukami. Węzeł początkowy to węzeł wejściowy a węzeł końcowy to węzeł wyjściowy.

Odwzorowanie umożliwia wydzielenie i zdefiniowanie następujących elementów sieci ciepłowniczej:

- węzłów,
- odcinków sieci zasilającej i powrotnej,
- źródła ciepła,
- zasobnik ciepła
- pompowni wody ciepłowniczej,
- węzła ciepłowniczego,
- zaworu regulacyjnego.

Wezeł – jest to punkt, w którym:

- spotykają się 2 rury o różnych średnicach, różnych, technologiach wykonania izolacji bądź różnych warunkach otoczenia – sieć kanałowa, sieć naziemna;
- miejsce montażu trójnika;
- usytuowanie pompowni, źródła ciepła, zasobnika ciepła, węzła ciepłowniczego bądź zaworu regulacyjnego;
- zmiana kierunku trasy sieci.

Odcinek sieci zasilającej i powrotnej. Odcinkiem sieci jest rura o stałej średnicy, jednorodnej technologii wykonania i izolacji, w stałych warunkach otoczenia np. sieć kanałowa podziemna z określoną przynależnością do sieci zasilającej bądź do sieci powrotnej. Połączenia obu sieci następują w źródłach, zasobnikach ciepła, węzłach ciepłowniczych bądź przy montażu zaworów regulacyjnych w obiegach hydraulicznych tzw. zmieszanie zimne.

Źródło ciepła, zasobnik, pompownia, węzeł ciepłowniczy, zawór regulacyjny – określane są mianem węzła wyróżnionego a także elementem nierurowym. Każdy z nich opisywany jest parametrami charakterystycznymi i może występować w grafie kilka razy.

W sieci ciepłowniczej występują węzły zasilane z dwóch kierunków. Pozostała architektura ma charakter drzewa. Nie mniej można określić kierunek przepływu wody dla każdego odcinka, czyli łuku. Uznajemy, że narzucony kierunek ma znak dodatni i nie zmieniamy kierunku podczas obliczeń sieci.

. Wybór kierunku nie ma wpływu na przebieg obliczeń oraz ich końcowy wynik. W przypadku sieci posiadających oczka kierunek przepływu nie zawsze jest znany.

Aby wykonać symulację sieci ciepłowniczej niezbędne jest odwzorowanie rzeczywistej sieci ciepłowniczej na sieć matematyczną, które można wykonać według następujących zależności:

$$S = \langle G, \{\phi_i\}, \{\psi_i\} \rangle \quad (6.1)$$

gdzie:

S – sieć matematyczna,

$G = (V, E)$ – graf opisujący topologię sieci,

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – zbiór węzłów,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – zbiór łuków,

Zbiór E jest podzbiorem iloczynu kartezjańskiego $V \times V$:

$$E \subset V \times V = (v_p, v_k), v_p \in V, v_k \in V, v_p \neq v_k, p, k = 1, \dots, n \quad (6.2)$$

gdzie:

$e = (v_p, v_k) \in E$, gdy istnieje połączenie łukiem węzłów początkowego

i końcowego,

$e = (v_p, v_k) \notin E$, gdy brak połączenia łukiem węzłów v_p i v_k ,

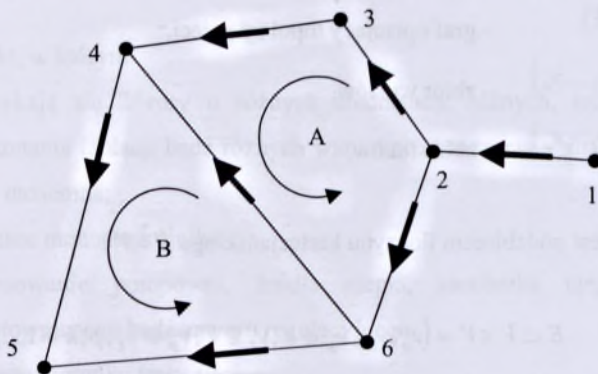
$\{\phi_i\}$ - zbiór funkcji $\phi_i : V \rightarrow R$ określonych na zbiorze węzłów i wartościach w zbiorze liczb rzeczywistych R ,

$\{\psi_i\}$ - zbiór funkcji $\psi_i : V \rightarrow R$ określonych na zbiorze łuków i wartościach w zbiorze liczb rzeczywistych R .

Zbiory funkcji $\{\phi_i\}$, $\{\psi_i\}$ nazywane są modelami matematycznymi lub charakterystykami odwzorowanych obiektów. W stanie ustalonym (symulacja statyczna) funkcje $\{\phi_i\}$ oraz $\{\psi_i\}$ nie zależą od czasu i będą nazywane również parametrami, a w standardowej bazie danych atrybutami.[20].

Przepływ do sieci (zasilanie) lub wypływ z sieci na zewnątrz (odbior) może zachodzić tylko przez punkty węzłowe – węzły. Z matematycznego punktu widzenia konieczne jest wyznaczenie minimum jednego węzła, nazywanego węzłem niezależnym, o znanej wartości ciśnienia. Wszystkie wartości w pozostałych węzłach i przewodach są zależne od wartości w tym węźle. Sieć może mieć większą liczbę węzłów ze zdefiniowanymi ciśnieniami. Będą one tworzyć zbiór węzłów niezależnych sieci.

Przewody mogą łączyć się ze sobą tworząc oczka. Na przykładowym rys. 6.1 przedstawiono dwa oczka: A i B.



Rysunek 6.1 Topologia sieci
Figure 6.1 Network topology

Zależność między liczbą łuków, węzłów oraz oczek jest następująca:

$$k = m - n + 1 \quad (6.3)$$

gdzie:

- k – liczba oczek podstawowych,
- m – liczba łuków,
- n – liczba węzłów.

Dla każdego węzła sieci obowiązuje I prawo Kirchoffa, które mówi, że suma algebraicznych przepływów w każdym węźle wynosi zero.

W postaci macierzowej można je zapisać w następujący sposób:

$$\underline{A}_1 \cdot \dot{\underline{M}} = \dot{\underline{L}}^* \quad (6.4)$$

gdzie:

$\underline{A}_1 = [a_{ij}]_{(n-n_1) \times m}$ – macierz incydencji węzłów obciążonych i łuków [2],

n – liczba węzłów,

m – liczba łuków,

n_1 – liczba węzłów wyróżnionych (źródła),

$\dot{\underline{M}}^T = [\dot{M}_1, \dot{M}_2, \dots, \dot{M}_m]$ – wektor strumieni masowych czynnika cieplowniczego w łukach grafu sieci,

$(\dot{\underline{L}}^*)^T = [\dot{L}_1^*, \dot{L}_2^*, \dots, \dot{L}_{n-n_1}^*]$ – wektor obciążeń w węzłach grafu sieci.

Druga podstawowa zasada obliczeń sieci to II prawo Kirchoffa, według którego suma algebraiczna spadków ciśnienia w każdym oczku, poczynając od dowolnego punktu węzłowego wynosi zero. W postaci macierzowej można je zapisać w następujący sposób:

$$\underline{B}_f \cdot \underline{\Delta p} = \underline{0} \quad (6.5)$$

gdzie:

$\underline{B}_f = [b_{ij}]_{k \times m}$ – macierz incydencji oczek podstawowych i łuków [2],

k – liczba oczek podstawowych,

$\underline{\Delta p}^T = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_m]$ – wektor spadków ciśnienia w łukach.

Pompy są elementami nieliniowymi sieci cieplownicznych. Charakterystykę hydrauliczną pompy aproksymować można wielomianem kwadratowym [20]:

$$\Delta p_p = a\dot{M}^2 + b\dot{M} + c \quad (6.6)$$

gdzie:

Δp_p – wzrost ciśnienia na pompie, Pa,

\dot{M} – strumień masowy czynnika cieplowniczego, kg/s,

a, b, c – współczynniki wielomianu kwadratowego,

Współcześnie stosowane układy pompowe wyposażone są w regulację pozwalającą na automatyczną realizację zadanych parametrów. Dla scharakteryzowania pracy pompy wystarczające jest podanie wartości jednego z parametrów pracy:

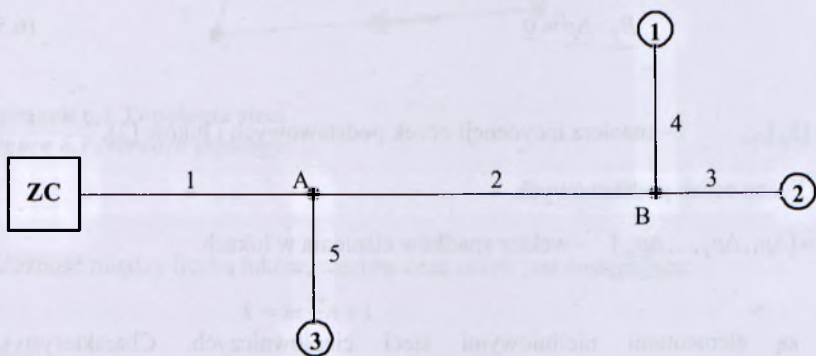
- przyrostu ciśnienia,
- ciśnienia na wyjściu,
- przepływu.

Rys. 6.2 przedstawia schemat sieci typu drzewo. Ta sama sieć została odwzorowana w postaci grafu na rys. 6.3. Przewody zasilające oraz powrotne tworzą oczka grafu. Symulowana sieć jest symetryczna pod względem ułożenia, ale zasilanie i powrót różnią się pod kilkoma względami:

Przewodami zasilającymi płynie czynnik o wyższej temperaturze,

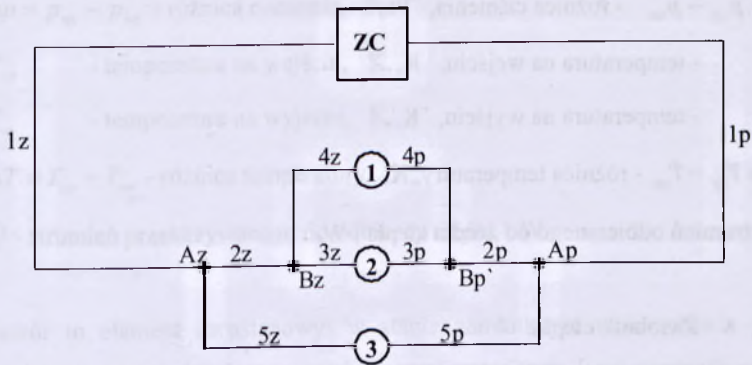
Straty ciepła są różne na przewodach zasilających i powrotnych,

Przewody zasilające mogą posiadać izolację cieplną o lepszych właściwościach.



Rysunek 6.2 Schemat sieci ciepłowniczej typu drzewo

Figure 6.2 Scheme of district heating network of the type tree



Rysunek 6.3 Graf sieci ciepłowniczej pokazanej na rysunku 6.2
Figure 6.3 Graph of the district heating network showed on fig. 6.2

Na przykładzie rys. 6.2 oraz 6.3 można wyróżnić podstawowe elementy systemu ciepłowniczego, którymi są źródło ciepła (ZC), sieć ciepłownicza oraz odbiorcy ciepła (1, 2, 3). Czynnik ciepłowniczy płynie od źródła ciepła (ZC) siecią ciepłowniczą do węzłów ciepłowniczych u odbiorców ciepła. W tym czasie w punktach węzłowych sieci ciepłowniczych dochodzi od podziału strumienia czynnika ciepłowniczego i rozplywu w różnych kierunkach. W węzłach ciepłowniczych zachodzi przekazanie części energii cieplnej transportowanej przez czynnik ciepłowniczy do instalacji wewnętrznych. Następnie ochłodzony czynnik ciepłowniczy powraca przewodami powrotnymi do źródła ciepła, gdzie dochodzi do jego ogrzania.

6.1.2 Parametryczny opis obiektów systemu ciepłowniczego

Węzłowi zwykłemu sieci ciepłowniczej przyporządkowane są trzy parametry:

\dot{M} - strumień masowy poboru czynnika ciepłowniczego, kg/s,

p - ciśnienie, Pa,

T - temperatura, K,

Węzeł wyróżniony jest opisany przez parametry właściwe dla danego Elementu Nierurowego:

▪ Źródło ciepła:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

p_{we} - ciśnienie wejściowe, Pa,

p_{wy} - ciśnienie wyjściowe, Pa,

$\Delta p = p_{wy} - p_{we}$ - różnica ciśnienia, Pa,

T_{we} - temperatura na wejściu, K,

T_{wy} - temperatura na wyjściu, K,

$\Delta T = T_{wy} - T_{we}$ - różnica temperatury, K,

\dot{Q} - strumień odbieranego od źródła ciepła, W.

▪ Zasobnik ciepła:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

T_{we} - temperatura na wejściu, K,

T_{wy} - temperatura na wyjściu, K,

$\Delta T = T_{wy} - T_{we}$ - różnica temperatury, K,

\dot{Q} - strumień odbieranego bądź akumulowanego ciepła, W.

▪ Przepompownia:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

p_{we} - ciśnienie wejściowe, Pa,

p_{wy} - ciśnienie wyjściowe, Pa,

$\Delta p = p_{wy} - p_{we}$ - różnica ciśnienia, Pa,

▪ Zawór regulacyjny:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

p_{we} - ciśnienie wejściowe, Pa,

p_{wy} - ciśnienie wyjściowe, Pa,

$\Delta p = p_{wy} - p_{we}$ - różnica ciśnienia, Pa,

▪ Odbiorca ciepła- węzeł ciepłowniczy:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

p_{we} - ciśnienie wejściowe, Pa,

p_{wy} - ciśnienie wyjściowe, Pa,

$\Delta p = p_{wy} - p_{we}$ - różnica ciśnienia, Pa,

T_{we} - temperatura na wejściu, K,

T_{wy} - temperatura na wyjściu, K,

$\Delta T = T_{wy} - T_{we}$ - różnica temperatury, K,

\dot{Q} - strumień przekazywanego do odbiorcy ciepła, W.

Zawór to element dwustanowy: w stanie zamkniętym uniemożliwia przepływ między incydentnymi do niego rurami, w stanie otwartym jego oporność przepływu wynosi zero.

W procesie obliczeniowym każdy element nieliniowy powinien być opisany za pomocą jednego parametru spośród parametrów opisujących transportu masy. Dodatkowo elementy nieliniowe takie jak źródło ciepła oraz odbiorca ciepła muszą być opisane jednym parametrem spośród parametrów opisujących transport energii.

Łuki sieci są opisane przez następujące parametry:

▪ Dane:

L - długość, m,

D - średnica, m,

k - chropowatość bezwzględna, mm,

ζ - współczynnik oporu miejscowego,

q - średnia jednostkowa strata ciepła, W/m,

L_z - długość zastępcza miejscowych strat ciepła, m,

▪ Wyniki obliczeń:

\dot{M} - strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

w - prędkość przepływu, m/s,

λ - współczynnik oporu hydraulicznego,

Re - liczba Reynoldsa,

\dot{Q}_s - straty ciepła, W,

ΔT - spadek temperatury, K,

T_k - temperatura na końcu łuku, K,

\dot{Q}_p - strumień energii cieplnej na początku łuku, W,

\dot{Q}_k - strumień energii cieplnej na końcu łuku, W.

W module obliczeniowym przyjęte zostało następujące równanie dla opisanego spadku ciśnienia w rurze:

$$\Delta p_s = \frac{8}{d^4 \pi^2 \rho} \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \dot{M}^2 \quad (6.7)$$

gdzie:

- Δp_s – spadek ciśnienia, Pa,
- λ – współczynnik oporu liniowego,
- ζ – współczynnik oporu miejscowego,
- L – długość rury, m,
- d – średnica wewnętrzna rury, m,
- ρ – gęstość, kg/m^3 ,
- \dot{M} – przepływ masowy czynnika, kg/s .

Powyższe równanie jest modelem matematycznym przepływu.

Przyjęto, że spadek temperatury w łuku opisuje następujące równanie:

$$\Delta T = \frac{\dot{q} \cdot (L + \sum L_z)}{\dot{M} c_w} \quad (6.8)$$

gdzie:

- ΔT – spadek temperatury, K,
- \dot{q} – średnia jednostkowa strata ciepła, W/m ,
- L – długość rury, m,
- L_z – długość zastępcza miejscowych strat ciepła, m,
- \dot{M} – strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s ,
- c_w – ciepło właściwe czynnika ciepłowniczego, J/kgK .

Powyższe równanie jest modelem matematycznym spadku temperatury w rurze.

Zmienne niezależne λ , ζ , ρ , \dot{q} , L_z mogą przyjmować średnie wartości dla całej sieci, lub też można określić np. λ , ζ , \dot{q} , L_z niezależnie dla każdej rury.

6.1.3 Zadanie symulacji statycznej sieci ciepłowniczej

Zadanie symulacji statycznej sieci ciepłowniczych jest następujące:

Dane wejściowe

Graf sieci matematycznej wraz z parametrami opisującymi dane wejściowe obiektów sieci:

Zbiór węzłów:

- strumień masowy poboru czynnika ciepłowniczego,
- wysokość położenia węzła – opcjonalnie,

Zbiór łuków:

- długość,
- średnica,
- chropowatość bezwzględna,
- współczynnik oporu miejscowego,
- średnia jednostkowa strata ciepła,
- długość zastępcza miejscowych strat ciepła,

Zbiór Elementów nerurowych:

W każdym źródle określony jest jeden parametr pracy spośród możliwych:

- przepływ,
- ciśnienie wejściowe,
- ciśnienie wyjściowe,
- różnica ciśnienia

oraz jeden parametr pracy spośród możliwych:

- różnica temperatury,
- temperatura na wyjściu,
- strumień przekazywanego ciepła,

W każdej przepompowni i zaworze regulacyjnym określony jest jeden parametr pracy spośród możliwych:

- przepływ,
- ciśnienie wejściowe,
- ciśnienie wyjściowe,
- różnica ciśnienia,

Dla każdego odbiorcy ciepła określony jest jeden parametr pracy spośród możliwych:

- przepływ,
- różnica ciśnienia

oraz jeden parametr opisujący wymianę energii:

- różnica temperatury.

Rozwiązaniem zadania symulacji statycznej są wyniki obliczeń w postaci wartości następujących parametrów:

w każdym węźle:

- wartość ciśnienia,
- wartość temperatury.

w każdym łuku:

- wartość strumienia masowego,
- wartość prędkości przepływu,
- wartość współczynnika oporów liniowych,
- wartość liczby Reynoldsa,
- wartość strat ciepła,
- wartość spadku temperatury,
- wartość temperatury na końcu łuku,
- wartość strumienia energii cieplnej na początku łuku,
- wartość strumienia energii cieplnej na końcu łuku.

w każdym Elementie Nierurowym:

- wartość parametrów opisujących poszczególne Elementy Nierurowe.

6.2. Przepływ masy w systemie ciepłowniczym

W celu wykonania symulacji przepływu w sieci ciepłowniczej niezbędne jest określenie parametrów przepływu na wejściu i wyjściu ze źródeł ciepła oraz charakterystyk przepływu przez węzły ciepłownicze. Zarówno na przepływ przez źródła ciepła, jak i przez węzły ciepłownicze, wpływ ma wiele czynników a ich charakterystyki, często będące przedmiotem regulacji są bardzo zróżnicowane.

6.2.1 Przepływ w źródłach ciepła

Celem pracy systemu ciepłowniczego jest odbiór energii cieplnej ze źródła ciepła i dostarczenie tej energii do odbiorcy. Przepływ w źródłach ciepła zależy będzie bezpośrednio od zapotrzebowania na energię cieplną oraz parametrów czynnika ciepłowniczego.

Pod względem symulacji sieci ciepłowniczej istotna jest znajomość straty ciśnienia przy danym przepływie. Na zmiany ciśnienia w źródłach ciepła wpływ może mieć wiele czynników, w tym: straty liniowe i miejscowe przy przepływie przez przewody i armaturę instalacji, straty miejscowe przy przepływie przez wymiennik ciepła, wzrost ciśnienia w instalacji pompowej, zmiana ciśnienia w armaturze regulacyjnej. Charakterystyki przepływu w źródłach ciepła mogą być wyznaczane dla każdego źródła ciepła indywidualnie w sposób doświadczalny, na podstawie charakterystyk opartych na pomiarach historycznych lub poprzez wykonanie szczegółowych obliczeń.

Do celów symulacji sieci ciepłowniczej źródło ciepła opisać można z wykorzystaniem takich parametrów jak przepływ, ciśnienie na wejściu i ciśnienie na wyjściu, temperatura na wyjściu i temperatura na wejściu.

6.2.2 Przepływ w sieci ciepłowniczej

Model matematyczny ustalonego przepływu gorącej wody w sieci przewodów rurowych jest równaniem algebraicznym nieliniowym. Model ten opisuje zależność między wartością spadku ciśnienia, wielkością przepływu, wymiarami geometrycznymi przewodów, właściwościami przewodów i właściwościami gorącej wody.

Równanie przepływu spełnia następujące założenia:

Ruch jest w stanie ustalonym, czyli nie ma zmian przepływu w czasie,

Zmiany gęstości wody na długości przewodu wynikające z liniowych strat ciepła są pomijalne,

Rurociąg ma stały przekrój poprzeczny,

Straty liniowe na długości rurociągu L opisane są wzorem Darcy'go-Weisbacha.

Model matematyczny określający wielkość strat ciśnienia w czasie przepływu uwzględnia straty liniowe i miejscowe:

$$\Delta p_S = \Delta p_L + \Delta p_M \quad (6.9)$$

gdzie:

Δp_S – całkowita strata ciśnienia w przewodzie, Pa,

Δp_L – liniowa strata ciśnienia, Pa,

Δp_M – miejscowa strata ciśnienia wynikająca z obecności oporów miejscowych, Pa.

Liniowe straty ciśnienia opisuje wzór Darcy'go-Weisbacha:

$$\Delta p_L = \lambda \frac{L v^2}{d} \rho \quad (6.10)$$

gdzie:

- λ – współczynnik oporu liniowego,
- L – długość rury, m,
- d – średnica wewnętrzna rury, m,
- v – prędkość przepływu wody, m/s,
- ρ – gęstość wody, kg/m³.

Dokładność obliczeń liniowych strat ciśnienia zależy głównie od dokładności wyznaczania współczynnika oporów liniowych przewodu:

$$\lambda = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \quad (6.11)$$

gdzie:

- Re – liczba Reynoldsa,
- ε – względna chropowatość rury.

Z dużą dokładnością można obliczyć współczynnik oporu liniowego stosując wzór Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right) \quad (6.12)$$

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} \quad (6.13)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (6.14)$$

gdzie:

- v – prędkość przepływu wody, m/s,
- ν – kinematyczny współczynnik lepkości cieczy, m²/s,
- d – średnica wewnętrzna rury, m,
- k – chropowatość bezwzględna powierzchni wewnętrznej rury, m.

Wzór Colebrooka-White'a można stosować w całym zakresie turbulentnego przepływu wody. Prostszy wzór, o postaci niuwickłanej, przedstawił Walden:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{6,1}{\text{Re}^{0,915}} + 0,268 \varepsilon \right) \quad (6.15)$$

W strefie kwadratowej zależności oporów wartość współczynnika λ obliczyć można ze wzoru Nikuradsego:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \lg \frac{1}{\varepsilon} \right)^2} \quad (6.16)$$

Wartość współczynnika oporów liniowych w strefie przepływu laminarnego ($\text{Re} < 2320$) opisuje wzór Hagen-Poiseuille'a:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (6.17)$$

Przepływ laminarny w sieciach ciepłowniczych występuje bardzo rzadko. W wyniku wysokiej temperatury wody, kinematyczny współczynnik lepkości wody ma małą wartość, a przepływ najczęściej jest burzliwy i zachodzi w kwadratowej strefie zależności oporów. Powyższe potwierdzone zostało w badaniach przeprowadzonych przez Niemyskiego [17].

Straty miejscowe wynikają z istnienia oporów miejscowych powodowanych przez:

- zasuwy,
- kolana,
- przewężenia, etc.

Wartość strat miejscowych określana jest ze wzoru:

$$\Delta p_M = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}, \text{ Pa} \quad (6.18)$$

gdzie:

ζ – współczynnik oporu miejscowego.

Wartość współczynnika oporu miejscowego określana jest doświadczalnie. Na podstawie badań dostrzeżono, że jego wartość zależy od: geometrii przeszkody, liczby Reynoldsa oraz chropowatości przewodu.

Ostatecznie:

$$\Delta p_S = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6.19)$$

lub

$$\Delta p_S = K \dot{M}^2 \quad (6.20)$$

gdzie:

$$K = \frac{8}{d^4 \pi^2 \rho} \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \quad (6.21)$$

Δp_S – strata ciśnienia w łuku, Pa,

K – współczynnik strat ciśnienia, 1/(kg·m).

\dot{M} – strumień masowy czynnika cieplowniczego, kg/s,

λ – współczynnik oporu liniowego,

L – długość rury, m,

d – średnica wewnętrzna rury, m,

ρ – gęstość wody, kg/m³,

ζ – współczynnik oporu miejscowego.

6.2.3 Przepływ w węzłach ciepłowniczych

Węzeł ciepłowniczy jest złożony z wielu urządzeń wywierających wpływ na przepływ czynnika sieciowego. W każdym współczesnym węźle znajdują się elementy zabezpieczające, pomiarowe, transformujące oraz regulujące, a do obliczeń pracy poszczególnych z nich, stosowane są osobne programy komputerowe.

Zależnie od typu i wyposażenia węzła ciepłowniczego mogą one posiadać następujące elementy wpływające na hydraulikę:

- wymiennik ciepła,
- regulator temperatury,
- regulator ciśnienia i różnicy ciśnienia
- regulator przepływu.

Wymiennik ciepła pracuje w węźle ciepłowniczym tak, by dostarczać do instalacji ciepło z określoną mocą:

$$\dot{Q} = \dot{M} \Delta T c_w \quad (6.22)$$

gdzie:

\dot{Q} – strumień energii cieplnej, W,

c_w – ciepło właściwe czynnika ciepłowniczego, J/kgK,

\dot{M} – strumień masowy czynnika ciepłowniczego, kg/s,

ΔT – różnica temperatury czynnika ciepłowniczego na zasilaniu i na powrocie, K.

$$\Delta T = T_z - T_p \quad (6.23)$$

gdzie:

T_z – temperatura czynnika ciepłowniczego na zasilaniu, K,

T_p – temperatura czynnika ciepłowniczego na powrocie, K.

Charakterystyki cieplne wymienników różnią się zależnie od ich właściwości cieplnych. Dostępne są nomogramy a także programy komputerowe umożliwiające określenie strumienia masowego czynnika ciepłowniczego \dot{M} płynącego przez wymiennik przy zadanym zapotrzebowaniu na ciepło \dot{Q} oraz określonej temperaturze wody sieciowej i instalacyjnej.

Z kolei na podstawie przepływu czynnika sieciowego \dot{M} mamy możliwość wyznaczenia ciśnienia w węzle początkowym i końcowym węzła ciepłowniczego.

Bezpośrednie połączenie sieci ciepłowniczej z instalacją wewnętrzną

W przypadku bezpośredniego połączenia sieci i instalacji, często z wykorzystaniem kryzy, zaworu regulacyjnego, hydroelewatora, czy pompy mieszającej, na hydraulikę węzła po stronie sieci ciepłowniczej ma wpływ instalacja wewnętrzna.

Regulatory temperatury

Regulatory temperaturowe decydują o zmianach mocy cieplnej urządzenia transformującego oraz temperaturze czynnika. Występują regulatory stałowartościowe oraz o zmiennej wartości regulowanej. Inny typ regulatorów, to nadążne regulatory temperatury, których działanie polega na możliwości zmiany temperatury czynnika w zależności od temperatury zewnętrznej.

Regulatory ciśnienia i różnicy ciśnień

Pełnią rolę pomocniczą zapewniając stabilną pracę węzła ciepłowniczego.

Regulatory przepływu

Zapewniają stabilny przepływ czynnika ciepłowniczego. Powszechnie stosowanym jest też ogranicznik przepływu.

Dla celów symulacji wskazane jest sformułowanie uproszczonego modelu węzła ciepłowniczego uwzględniającego podstawowe parametry jego pracy, z których najważniejszym pod względem hydraulicznym jest spadek ciśnienia wody sieciowej przy określonym przepływie czynnika ciepłowniczego.

Odbiorca jest najważniejszym elementem systemu ciepłowniczego, gdyż to on poprzez swoje zużycie kształtuje wartości przepływów w sieci.

6.3 Straty ciepła sieci ciepłowniczej

Podczas przesyłania ciepła sieciami ciepłowniczymi dochodzi do znacznych strat ciepła sięgających nawet 15% całkowitej przesyłanej energii cieplnej. Ciepło od czynnika ciepłowniczego przenika przez ścianki rurociągu i izolację do otoczenia.

Istotny wpływ ma tu sposób ułożenia sieci. Najczęściej stosowanym współcześnie rozwiązaniem jest układanie sieci rurociągów preizolowanych bezpośrednio w gruncie. Dość częste jest także prowadzenie przewodów w kanałach oraz na zewnątrz na słupach.

Stratą ciepła systemu ciepłowniczego nazywamy różnicę strumienia energii cieplnej wytwarzanej w źródle ciepła \dot{Q}_h i strumienia energii cieplnej dostarczanej do punktów odbioru \dot{Q}'_h :

$$\dot{Q}_{str} = \dot{Q}_h - \dot{Q}'_h \quad (6.24)$$

gdzie:

- \dot{Q}_{str} – strata ciepła systemu ciepłowniczego, W,
- \dot{Q}_h – strumień energii cieplnej wytwarzanej w źródle ciepła, W,
- \dot{Q}'_h – strumień energii cieplnej dostarczanej do punktów odbioru, W.

Sprawnością cieplną systemu ciepłowniczego nazywamy stosunek strumienia energii cieplnej dostarczanej do punktów odbioru \dot{Q}'_h do strumienia energii cieplnej wytwarzanej w źródle ciepła \dot{Q}_h :

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}'_h}{\dot{Q}_h} = \frac{\dot{Q}_h - \dot{Q}_{str}}{\dot{Q}_h} = 1 - \frac{\dot{Q}_{str}}{\dot{Q}_h} \quad (6.25)$$

Sprawność cieplna systemu ciepłowniczego zależy od:

- zasięgu sieci ciepłowniczej,
- ilości i rodzaju transportowanego czynnika grzejnego,
- sposobu prowadzenia przewodów i ich grubości,
- oporu przepływu ciepła.

6.3.1 Straty ciepła rurociągów

Straty ciepła podobnie jak straty ciśnienia można podzielić na straty ciepłone w odcinkach prostych przewodów i na straty miejscowe. Straty ciepła miejscowe dotyczą oporów cieplnych kształtek, armatury, podpór stałych i ruchomych itp.

Straty ciepła liniowe określa wzór:

$$\dot{Q}_l = \dot{q}L \quad (6.26)$$

gdzie:

\dot{Q}_l – straty ciepła liniowe, W,

\dot{q} – średnia jednostkowa strata ciepła, W/m,

L – długość przewodu, m.

Straty ciepła wszystkich części przewodów, takich jak łuki, kolana, zwężki, odnogi, które zwykle izolowane są w podobny sposób jak przewody proste, a średnice tych kształtek są takie same jak średnice przewodów, oblicza się tak samo jak straty ciepła przewodów, sumując ich długość do długości przewodów prostych.

Straty ciepła pozostałych części przewodów, jak kołnierze, uzbrojenie i podpory, oblicza się osobno, przy czym jedną z metod obliczeń jest metoda uwzględniania tych strat ciepła w stracie ogólnej przez dodawanie do długości przewodów prostych tzw. Długości zastępczych przewodów o takiej samej średnicy.

Miejscowe straty ciepła można wyrazić wzorem:

$$\dot{Q}_m = \dot{q} \sum L_z \quad (6.27)$$

gdzie:

\dot{Q}_m – miejscowe straty ciepła, W,

\dot{q} – średnia jednostkowa strata ciepła, W/m,

$\sum L_z$ – suma długości zastępczych, m.

Wartości liczbowe długości zastępczych określa się doświadczalnie. Przykładowo strata ciepła przez zawór normalnej konstrukcji lub zasuwę odpowiada 15÷20 m przewodu izolowanego o takiej samej średnicy, przy czym dolna wartość odnosi się do przewodów o mniejszej średnicy i niższej temperaturze czynnika ciepłowniczego.

Ostatecznie straty ciepła przewodu z pewnym przybliżeniem obliczyć można ze wzoru:

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_l + \dot{Q}_m = \dot{q} \cdot (L + \sum L_z) \quad (6.28)$$

Średnią jednostkową stratę ciepła dla danego łuku sieci ciepłowniczej obliczyć można z następującego wzoru:

$$\dot{q} = \frac{\Delta t}{\sum R} = \frac{\tau - t_o}{\sum R} \quad (6.29)$$

gdzie:

- τ – średnia temperatura czynnika grzejjego, K,
- t_o – średnia temperatura otoczenia, K,
- $\sum R$ – suma oporów przewodzenia ciepła przez wszystkie warstwy oddzielające czynnik grzejny od otoczenia oraz oporów napływu ciepła od czynnika grzejjego do ścianki rury oraz od powierzchni zewnętrznej izolacji do otoczenia, mK/W.

Dla izolacji jednowarstwowej szczelnie przylegającej do ścianki rury przewodu wartość sumaryczna oporu przepływu ciepła jest następująca:

$$\sum R = R_n + R_r + R_{iz} + R_o \quad (6.30)$$

gdzie:

- R_n – opór napływu ciepła od czynnika grzejjego do ścianki rury, mK/W,
- R_r – opór przepływu ciepła przez ściankę rury, mK/W,
- R_{iz} – opór przepływu ciepła przez warstwę izolacyjną, mK/W,
- R_o – opór odpływu ciepła z powierzchni izolacji do otoczenia, mK/W.

Oporę przyjmowania ciepła R_n i R_o dla jednego metra bieżącego przewodu cylindrycznego określić można ze wzoru:

$$R = \frac{1}{\pi d \alpha_o} \quad (6.31)$$

gdzie:

- R – opór przyjmowania ciepła dla jednego metra bieżącego przewodu cylindrycznego, mK/W,
- πd – pole powierzchni cylindra o średnicy d m i długości 1 m,
- α_o – współczynnik przyjmowania ciepła, W/m²K.

Zależnie od sposobu prowadzenia przewodu rozróżnia się trzy przypadki oddawania ciepła

- a) Przewód prowadzony jako nadziemny,
- b) Przewód prowadzony bezkanałowo w gruncie,
- c) Przewód prowadzony w kanale pod ziemią.

W każdym z tych przypadków różne są sposoby oddawania ciepła, a co za tym idzie, różne są wartości strat ciepła.

Wartość współczynnika napływu ciepła od czynnika grzejnego do ścianki rury jest bardzo duża – dla wody rzędu od 2,3 do 3,5 kW/ m²K. Wartość oporu napływu ciepła R_n jest pomijalna w porównaniu z wartościami pozostałych oporów.

W porównaniu z wartością oporu cieplnego warstwy izolacji R_{iz} opór przepływu ciepła przez ściankę rury R_r jest pomijalnie mały ze względu na bardzo dużą wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ , który dla stali wynosi 57 W/mK. Ponadto grubość ścianki nie przekracza kilku do kilkunastu mm. Z tego względu w obliczeniach strat ciepła uwzględnia się zwłaszcza opór przepływu ciepła przez warstwę izolacyjną R_{iz} oraz opór odpływu ciepła z powierzchni izolacji do otoczenia R_o , a nie uwzględnia się oporu napływu ciepła od czynnika grzejnego do ścianki rury R_n i oporu przepływu ciepła przez ściankę rury R_r . Po uwzględnieniu tych uproszczeń zwór na straty ciepła można zapisać następująco:

$$\dot{Q}_s = \frac{\tau - t_o}{R_{iz} + R_o} \cdot (L + \sum L_z) \quad (6.32)$$

gdzie:

- \dot{Q}_s – straty ciepła, W,
- τ – średnia temperatura czynnika grzejnego, K,
- t_o – średnia temperatura otoczenia, K,
- R_{iz} – opór przepływu ciepła przez warstwę izolacyjną, mK/W,
- R_o – opór odpływu ciepła z powierzchni izolacji do otoczenia, mK/W,
- L – długość przewodu, m,
- $\sum L_z$ – suma długości zastępczych, m.

Gdy izolacja składa się z kilku warstw o różnych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła λ , opór przepływu ciepła oblicza się ze wzoru :

$$R_{iz} = R_{iz}^1 + R_{iz}^2 + R_{iz}^3 + \dots + R_{iz}^n \quad (6.33)$$

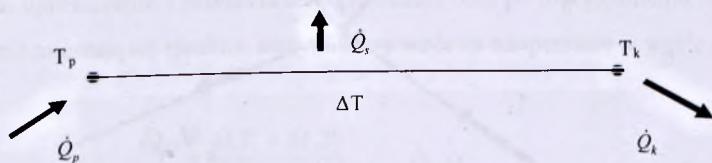
Sposobem uwzględnienia strat ciepła w łuku sieci ciepłowniczej może być przypisanie strat energii jako obciążenie węzła końcowego łuku.

6.4 Transport energii w sieci ciepłowniczej

System ciepłowniczy ma za zadanie dostawę energii cieplnej od źródeł ciepła do odbiorców. W celu określenia wielkości transportowanej energii konieczna jest znajomość przepływu oraz temperatury czynnika ciepłowniczego oraz jego ciepła właściwego.

6.4.1. Spadek temperatury w łuku sieci

Ilość energii cieplnej, która wypływa z łuku sieci ciepłowniczej nie jest równa ilości energii cieplnej wpływającej do tego łuku. Różnica między strumieniem energii, który wypływa z łuku, i strumieniem energii, który wpływa do łuku, równa jest stratom ciepła w tym łuku. Sposób przybliżonego określania strat ciepła został przedstawiony w poprzednich rozdziałach niniejszej pracy. Zmiana ilości energii transportowanej przez czynniki ciepłowniczy objawia się spadkiem jego temperatury.



Rysunek 6.4 Łuk sieci ciepłowniczej

Figure 6.4 Curve of the the district heating network

Spadek temperatury w łuku sieci jest proporcjonalny do strat ciepła na tym łuku oraz do przepływu masowego według następującego wzoru:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{M}c_w} \quad (6.34)$$

gdzie:

ΔT – spadek temperatury czynnika, K.

\dot{Q}_s – straty ciepła, W,

\dot{M} – strumień masowy wody, kg/s,

c_w – ciepło właściwe wody, J/kgK,

$$\Delta T = T_p - T_k \quad (6.35)$$

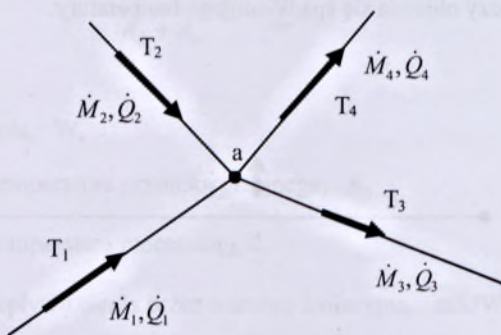
gdzie:

T_p – temperatura czynnika ciepłowniczego, który wpływa do łuku, K,

T_k – temperatura czynnika ciepłowniczego, który wypływa z łuku, K.

6.4.2 Mieszanie się strumieni

Strumienie wpływające do węzła mogą mieć różne temperatury. Zakładając, że strumienie czynnika ciepłowniczego mieszają się idealnie, temperaturę w węźle obliczyć można z bilansu energii cieplnej, która wpływa do węzła i z niego wypływa.



Rysunek 6.5 Mieszanie się strumieni
Figure 6.5 Streams mixing

Na rysunku 6.5 przedstawiony został przykład węzła, do którego wpływają dwa strumienie czynnika ciepłowniczego i z którego dwa strumienie czynnika ciepłowniczego wypływają. Dla powyższego przykładu bilans strumieni energii jest następujący:

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 \quad (6.36)$$

gdzie:

$\dot{Q}_1, \dot{Q}_2, \dot{Q}_3, \dot{Q}_4$ – strumienie energii czynnika ciepłowniczego, W,

Strumień energii cieplnej transportowanej przez czynnik ciepłowniczy opisuje wzór:

$$\dot{Q} = \dot{M}Tc_w \quad (6.37)$$

gdzie:

\dot{Q} – straty ciepła, W,

\dot{M} – strumień masy wody, kg/s,

T – temperatura czynnika ciepłowniczego, K.

c_w – ciepło właściwe wody, J/kgK,

Po podstawieniu do bilansu otrzymujemy:

$$\dot{M}_1 T_1 c_w + \dot{M}_2 T_2 c_w = \dot{M}_3 T_3 c_w + \dot{M}_4 T_4 c_w \quad (6.38)$$

Dla uproszczenia przyjęto, że ciepło właściwe czynnika ciepłowniczego ma stałą wartość. Po uproszczeniu i przekształceniu równania oraz po uwzględnieniu założeniu, iż strumienie mieszają się idealnie, otrzymujemy wzór na temperaturę w węźle a:

$$T_a = \frac{\dot{M}_1 T_1 + \dot{M}_2 T_2}{\dot{M}_3 + \dot{M}_4} \quad (6.39)$$

Na podstawie prawa zachowania masy otrzymujemy równanie:

$$\dot{M}_1 + \dot{M}_2 = \dot{M}_3 + \dot{M}_4 \quad (6.40)$$

Można więc zapisać:

$$T_a = \frac{\dot{M}_1 T_1 + \dot{M}_2 T_2}{\dot{M}_1 + \dot{M}_2} \quad (6.41)$$

Temperatura w węźle jest wagowo proporcjonalna do temperatury strumieni czynnika ciepłowniczego wpływających do węzła. Temperatury strumieni, które odpływają z tego węzła są takie same:

$$T_a = T_3 = T_4 \quad (6.42)$$

Każdy węzeł sieci ciepłowniczej jest zasilany przez czynnik ciepłowniczy wchodzący do niego z łuku lub/i ze źródła, którym dla obiegu zasilającego jest źródło ciepła, a dla obiegu powrotnego jest węzeł ciepłowniczy. Można to zapisać matematycznie w następujący sposób:

$$\sum_{s \in S_p} \dot{M}_s T_s + \sum_{q \in I_p} \dot{M}_q (T_q - \Delta T_q) = \dot{M}_p T_p \quad (6.43)$$

gdzie:

T_p – temperatura w węźle p, K,

\dot{M}_p – strumień masowy czynnika ciepłowniczego odpływającego z węzła p, kg/s,

T_q – temperatura w węźle początkowym łuku q, K,

ΔT_q – spadek temperatury w łuku q, K,

\dot{M}_q – strumień masowy czynnika ciepłowniczego w łuku q, kg/s,

T_s – temperatura w źródle s, K,

\dot{M}_s – strumień masowy czynnika ciepłowniczego dostarczany ze źródła s, kg/s.

6.5. Symulacja transportu masy

Czynnik ciepłowniczy posiada masę i charakteryzuje się pojemnością cieplną oraz temperaturą. Iloczyn masy, pojemności cieplnej i temperatury bezwzględnej czynnika to jego entalpia, czyli ilość energii cieplnej.

Transport energii zachodzi w taki sposób, że czynnik o wysokiej entalpii dopływa do węzła ciepłowniczego, oddaje część swojej energii i powraca do źródła ciepła, gdzie odbiera energię. Ponadto czynnik ciepłowniczy traci energię w czasie przepływu siecią ciepłowniczą.

Model matematyczny ustalonego przepływu gorącej wody w sieci przewodów rurowych jest równaniem algebraicznym nieliniowym. Model ten opisuje zależność między wartością spadku ciśnienia, wielkością przepływu, wymiarami geometrycznymi rurociągów, właściwościami rurociągów i właściwościami czynnika ciepłowniczego. Rozwiązaniem zadania symulacji są wartości ciśnienia w węzłach sieci i wielkości strumieni masowych w łukach, które spełniają I prawo Kirchoffa, II prawo Kirchoffa i równanie przepływu. W zależności od przyjętej metody rozwiązania, układ równań algebraicznych nieliniowych tworzony jest na podstawie nie spełnienia I lub II prawa Kirchoffa w punkcie startu obliczeń. Efektywne rozwiązanie dużego układu obliczeń nieliniowych nie jest zagadnieniem łatwym. Należy mieć na uwadze, że z praktycznego punktu widzenia ważne jest, aby algorytm obliczeniowy był szybki w sensie realizacji, dokładny, jeżeli chodzi o wartości końcowe i niezbyt wymagający w stosunku do zajętości pamięci komputera. Złożoność obliczeniowa będzie szczególnie istotna przy sieciach dużych o złożonych strukturach.

Sieci ciepłownicze różnią się od większości innych sieci tym, że składają się z dwóch części: przewodów zasilających i powrotnych. W większości przypadków przewody zasilające i powrotne są jednakowe, przepływy i straty ciśnienia są również takie same. Z tego powodu obliczenia sieci ciepłowniczych mogą często zostać uproszczone i dotyczyć tylko połowy sieci. W przypadku, gdy część zasilająca i część powrotna sieci różnią się od siebie, należy przeprowadzić obliczenia oddzielnie lub przeprowadzić symulację całej sieci łącznie zasilania i powrotu.

Symulacja transportu masy dla przypadku sieci ciepłowniczych sprowadza się do rozwiązania zagadnienia złożonego z trzech równań:

- a) I prawo Kirchoffa,
- b) II prawo Kirchoffa,

c) równanie transportu masy.

W postaci wektorowej I prawo Kirchoffa można zapisać następująco:

$$\underline{A}_1 \cdot \underline{\dot{M}} = \underline{\dot{L}}^* \quad (6.44)$$

gdzie:

$\underline{A}_1 = [a_{ij}]_{(n-n_1) \times m}$ – macierz incydencji węzłów obciążonych i łuków,

n – liczba węzłów,

m – liczba łuków,

n_1 – liczba węzłów wyróżnionych (źródła),

$\underline{\dot{M}}^T = [\dot{M}_1, \dot{M}_2, \dots, \dot{M}_m]$ – wektor strumieni masowych czynnika cieplowniczego w łukach grafu sieci,

$(\underline{\dot{L}}^*)^T = [\dot{L}_1^*, \dot{L}_2^*, \dots, \dot{L}_{n-n_1}^*]$ – wektor obciążeń w węzłach grafu sieci.

W postaci wektorowej II prawo Kirchoffa można zapisać następująco:

$$\underline{B}_f \cdot \underline{\Delta p} = \underline{0} \quad (6.45)$$

gdzie:

$\underline{B}_f = [b_{ij}]_{k \times m}$ – macierz incydencji oczek podstawowych i łuków,

k – liczba oczek podstawowych,

$\underline{\Delta p}^T = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_m]$ – wektor spadków ciśnienia w łukach.

Równanie przepływu:

$$\Delta p_s = \frac{8}{d^4 \pi^2 \rho} \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \dot{M}^2 \quad (6.46)$$

gdzie:

Δp_s – spadek ciśnienia, Pa,

λ – współczynnik oporu liniowego,

- ζ – współczynnik oporu miejscowego,
 L – długość rury, m,
 d – średnica wewnętrzna rury, m,
 ρ – gęstość, kg/m^3 ,
 \dot{M} – przepływ masowy czynnika, kg/s.

Metoda oczkowa oparta jest o układ powyższych równań:

$$\begin{aligned}
 A_1 \cdot \dot{M} &= \dot{L} \\
 B_f \cdot \Delta p &= 0 \\
 \Delta p_s &= f(\dot{M})
 \end{aligned}
 \tag{6.47}$$

Jego rozwiązaniem są wartości przepływów czynnika ciepłowniczego w łukach i wartości ciśnienia w węzłach sieci.

Algorytm symulacji transportu masy przyjmuje następującą postać:

I. DANE WEJŚCIOWE

- Topologia sieci ciepłowniczej,
- Dane o elementach sieci,
- Dane o źródłach ciepła.
 - Minimum jedno źródło o podanej wartości ciśnienia na wyjściu.

II. OBLICZENIA

Obliczanie wartości:

$\dot{M}[j]$ – strumień masowy czynnika ciepłowniczego w łukach,

$p[i]$ – ciśnienie w węzłach.

Dowolną metodą (oczkowa, węzłowa itp.) w oparciu o układ równań:

$$\Delta p_s = K \dot{M}^2$$

$$K = \frac{8}{d^4 \pi^2 \rho} \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right)$$

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}, \quad \varepsilon = \frac{k}{d}$$

$$\rho = \text{const.}$$

$$d = \text{const.}$$

$$\mu = \text{const.}$$

Warunek zakończenia obliczeń:

$$\text{Max}|q_i| \leq \varepsilon$$

lub:

$$\text{Max}|\Delta p_i| \leq \varepsilon$$

III. WYNIKI SYMULACJI

W każdym węźle:

- wartość ciśnienia.

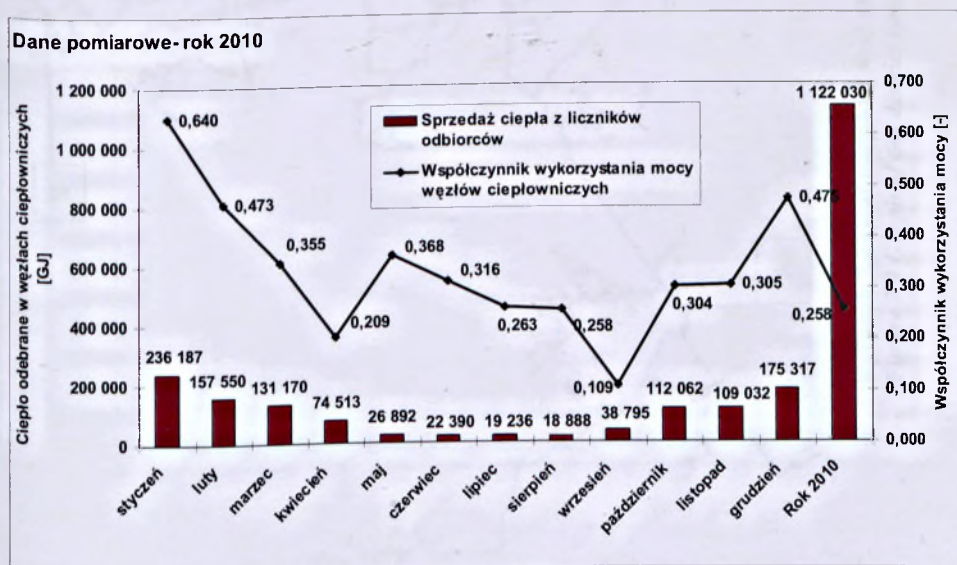
W każdym łuku:

- wartość strumienia masowego,
- wartość prędkości przepływu,
- wartość współczynnika oporów liniowych,
- wartość liczby Reynoldsa.

7 Symulacja komputerowa sieci ciepłowniczej

7.1 Weryfikacja modelu na zbiorze danych rzeczywistych

Obliczenia symulacyjne pracy sieci ciepłowniczej wykonano w oparciu o dane otrzymane z układów pomiarowych zainstalowanych na rzeczywistym obiekcie tj. w węzłach ciepłowniczych miejskiej sieci ciepłowniczej w Siedlcach w roku 2010. Z wartości sprzedaży ciepła zsumowany dla wszystkich węzłów ciepłowniczych obliczono współczynnik wykorzystania mocy wymienników zainstalowanych w węzłach. Są to wartości uśrednione w skali miesiąca. Dla okresu sezonu grzewczego współczynnik wykorzystania mocy jest ilorazem średniej miesięcznej mocy węzła odniesionej do mocy zainstalowanej tj. sumy mocy wymienników C.O i C.W.U. Dla okresu letniego odnosi się wyłącznie do mocy wymienników CWU. Stąd skok wartości współczynnika wykorzystania mocy w maju do poziomu 0,368 w porównaniu do kwietnia z 0,209 i spadek we wrześniu do wartości 0,109 w porównaniu do sierpnia z 0,258. Na rysunku 7.1 przedstawiono wartość sprzedaży i wartości współczynników wykorzystania mocy węzłów ciepłowniczych w podziale na miesiące.



Rysunek 7.1 Wartość sprzedaży ciepła w roku 2010 i współczynniki wykorzystania mocy

Figure 7.1 Heat sale in 2010 with power utilization factors

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla czterech miesięcy roku 2010: stycznia, marca, lipca i listopada.

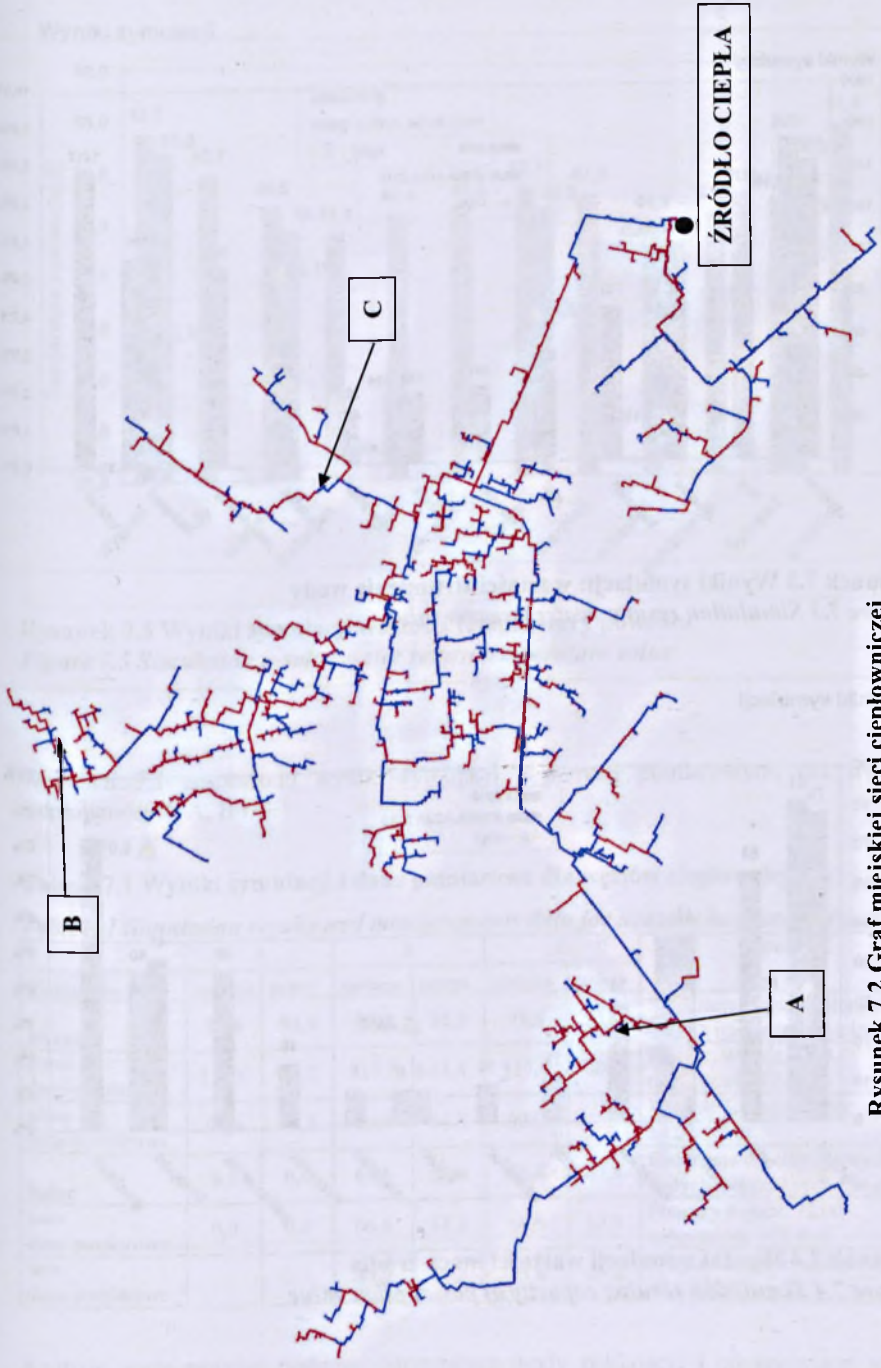
Weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o porównanie wyników otrzymanych na drodze symulacji z danymi rzeczywistymi zmierzonymi w czterech punktach sieci:

- w węzłach wejściowym i wyjściowym źródła ciepła,
- w węzłach początkowych i końcowych węzłów ciepłowniczych:
 - **A (ul. Podlaska 12)** - pracującego na potrzeby CO,
 - **B (ul. Mieszka 8)** - CO i CWU,
 - oraz **C (ul. Prusa 12)** - CO i CWU.

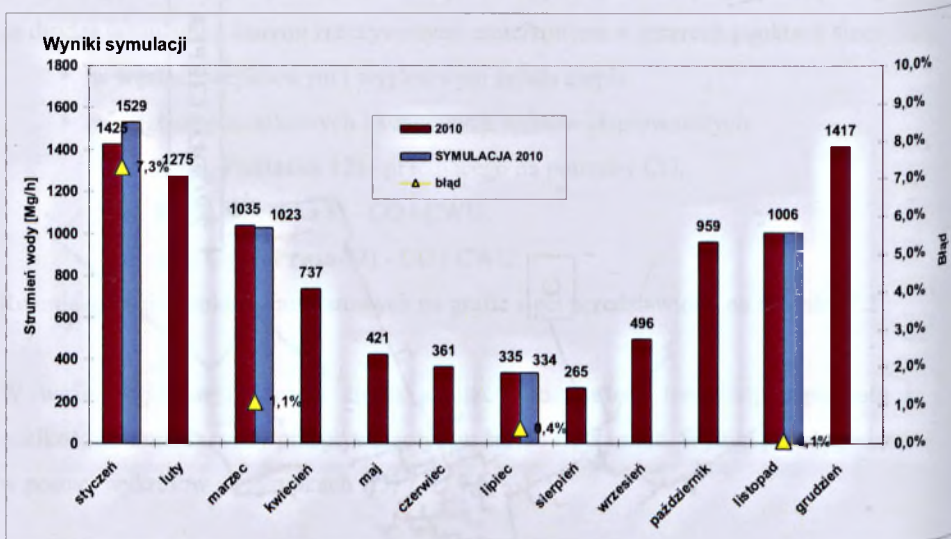
Rozmieszczenie punktów pomiarowych na grafie sieci przedstawiono na rysunku 7.2.

W węzle wejściowym źródła ciepła analizowano wartość temperatury powrotu i wielkość strumienia wody przepływającej a w źródle ciepła moc. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 7.3, 7.4 i 7.5.

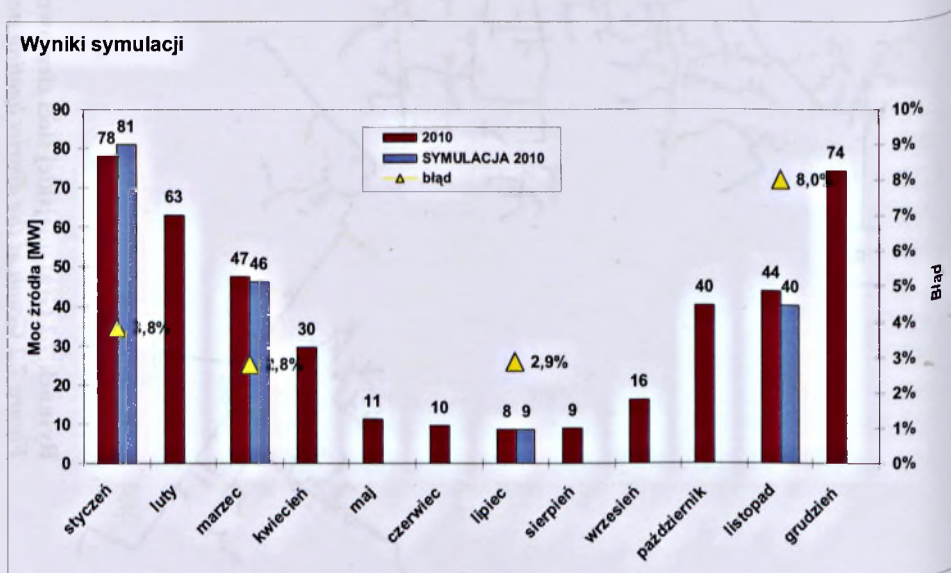




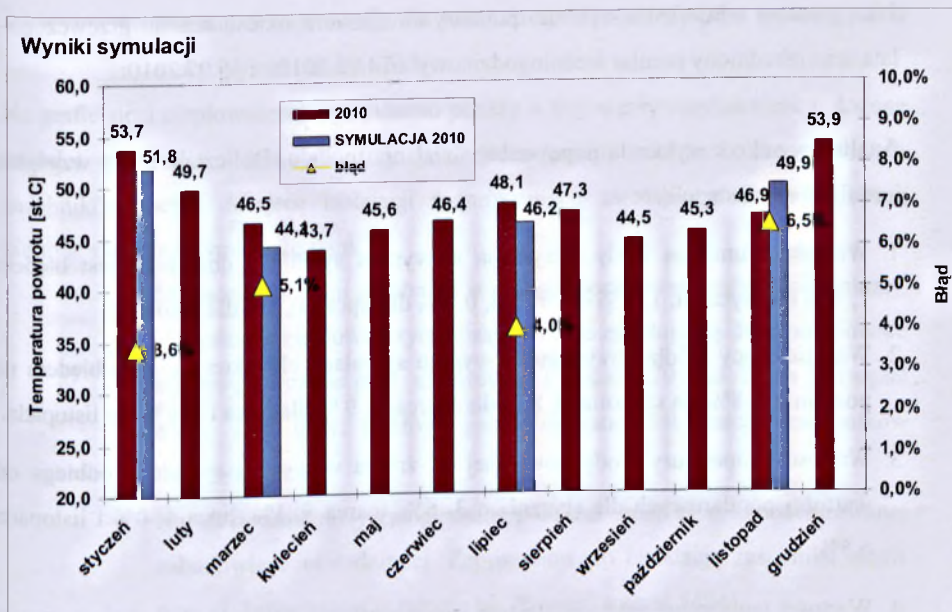
Rysunek 7.2 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej
Figure 7.2 Graph of the district heating network



Rysunek 7.3 Wyniki symulacji: wartości strumienia wody
 Figure 7.3 Simulation results: water streams value



Rysunek 7.4 Wyniki symulacji wartości mocy źródła
 Figure 7.4 Simulation results: capacity of power plant value



Rysunek 7.5 Wyniki symulacji wartości temperatury powrotu
Figure 7.5 Simulation results: water return temperature value

W tabeli 7.1 zestawiono wyniki symulacji z danymi pomiarowymi dla węzłów ciepłowniczych A, B i C.

Tabela 7.1 Wyniki symulacji i dane pomiarowe dla węzłów ciepłowniczych

Table 7.1 Simulation results and measurements data for heat exchangers stations

Temperatura wody	A		B		C		Uwagi
	zasilanie	powrót	zasilanie	powrót	zasilanie	powrót	
styczeń	99,8	53,5	99,0	52,8	99,6	53,3	Symulacja dla uśrednionych danych miesięcznych z in-caso
zima-dane pomiarowe	119,6	51,7	117,7	64,4	117,4	60,7	Pomiary o godz. 1:00 temp. zewn.-22 st.C
zima-dane pomiarowe	94,4	48,7	90,0	46,8	90,0	45,0	Wartość średnia z doby 14.02.2010r.
lipiec	0,0	0,0	69,6	53,6	71,4	47,2	Symulacja dla uśrednionych danych miesięcznych z in-caso
lato-dane pomiarowe	0,0	0,0	66,6	33,2	68,3	37,9	Pomiary o godz. 22:00 temp. zewn. +16 st.C
lato-dane pomiarowe			67,9	42,2	73,4	41,8	Wartość średnia z doby 15.07.2010r.

Analizie porównawczej poddano temperaturę wody zasilającej i opuszczającej węzeł ciepłowniczy. Parametry pracy systemu ciepłowniczego, jako dane do symulacji przyjęto wartości średniogodzinowe miesięczne z 2010r.

Jako pomiary odniesienia wybrano pomiary chwilowe z okresu sezonu grzewczego i lata oraz uśredniony pomiar średniogodzinowy z 14.02.2010r. i 15.07.2010r.

Analiza wyników wykazała poprawność działania modelu. Obliczone błędy względne kształtują się następująco:

1. Wartość strumienia wody otrzymana w wyniku symulacji obciążona jest błędem 7,3 % dla stycznia, 1,1 % dla marca, 0,4% dla lipca i 0,1% dla listopada.
2. Wartość mocy źródła otrzymana w wyniku symulacji charakteryzuje się błędem na poziomie 3,8% dla stycznia, 2,8 % dla marca, 2,9 % dla lipca i 8,0% dla listopada.
3. Wartość temperatury wody powrotnej do źródła w wyniku symulacji odbiega od wartości pomiarowych dla stycznia o 3,6%, marca 5,1%, lipca 4,0% i listopada 6,5%.
4. Wartości temperatur wody zasilającej i opuszczającej węzły ciepłownicze A, B i C mieszczą się w zakresie wartości temperatur rzeczywistych pomiarowych (tabela 1).

7.2 Scenariusze symulacji pracy systemu ciepłowniczego

Do dalszej analizy zmiany parametrów pracy sieci ciepłowniczego stosowano następujące warianty pracy systemu ciepłowniczego:

1. Scenariusz ZIMA – praca systemu ciepłowniczego w okresie sezonu grzewczego, co oznacza zaopatrywanie w ciepło odbiorców na potrzeby centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej.
 - Wariant 1 – symulacja dla uśrednionych w skali miesiąca stycznia 2010r. parametrów pracy węzłów ciepłowniczych i źródła,
 - Wariant 2 – symulacja dla parametrów pracy systemu dla danych pomiarowych z marca 2010r,
 - Wariant 3 – symulacja dla danych pomiarowych listopada 2010r.
2. Scenariusz LATO – praca systemu ciepłowniczego wyłącznie na potrzeby CWU.
 - Wariant 4 – symulacja dla danych pomiarowych z lipca 2010r,
 - Wariant 5 – symulacja dla wartości 80% współczynnika wykorzystania mocy wymienników CWU,

- Wariant 6 - symulacja dla wartości 20% współczynnika wykorzystania mocy wymienników CWU.

Na grafie sieci ciepłowniczej wyznaczono punkty – trzy węzły ciepłownicze położone najdalej od źródła ciepła oraz trzy potencjalne punkty włączenia rozproszonych zasobników ciepła. Miejsce instalacji rozproszonych zasobników ciepła wybrano kierując się poniższymi kryteriami:

- Miejsce lokalizacji zasobnika w miejscu pompowni wody ciepłowniczej. W systemie ciepłowniczym miasta Siedlce znajdują się dwie pompownie sieciowe położone przy ul. Krótkiej 1 (węzeł 129) i ul. Prusa 14 (węzeł 851). Dla tych węzłów zaproponowano lokalizację zasobników rozproszonych.
- Na sieci zasilającej (magistralnej) obszar miejski o skoncentrowanej zabudowie wielorodzinnej. Zaproponowano instalację zasobnika ciepła przy ul. Partyzantów w rejonie ul. Zbrojnej (węzeł 5494).

Na rysunku 7.6 przedstawiono graf sieci ciepłowniczej z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi, jako najbardziej odległe od źródła węzły ciepłownicze licząc długość sieci ciepłowniczej bądź potencjalne węzły podłączenia zasobników rozproszonych.

Rysunek 7.6 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej

Lokalizacja rozproszonych zasobników ciepła

Węzły ciepłownicze „krańcowe” tj. położone najdalej od źródła

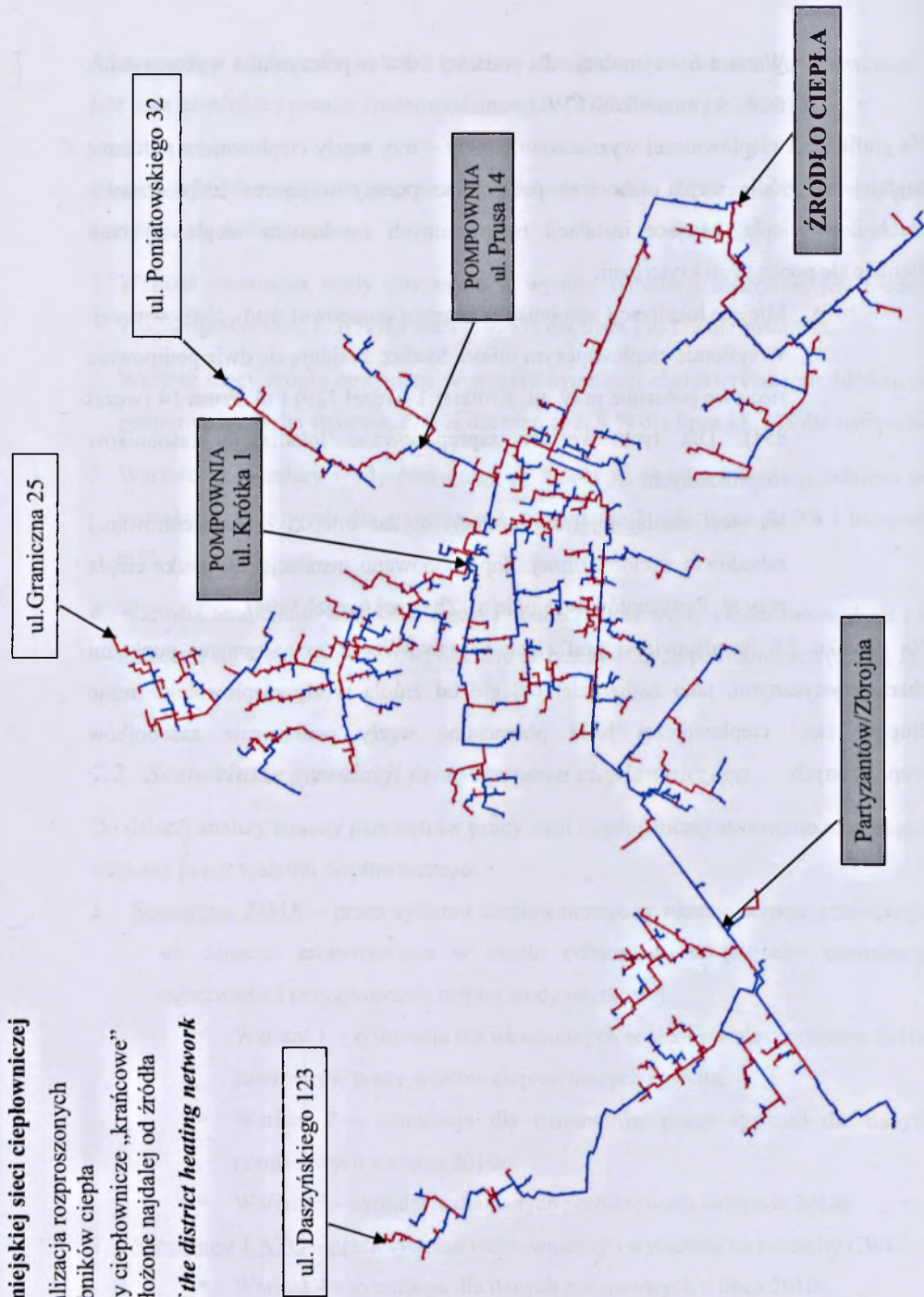
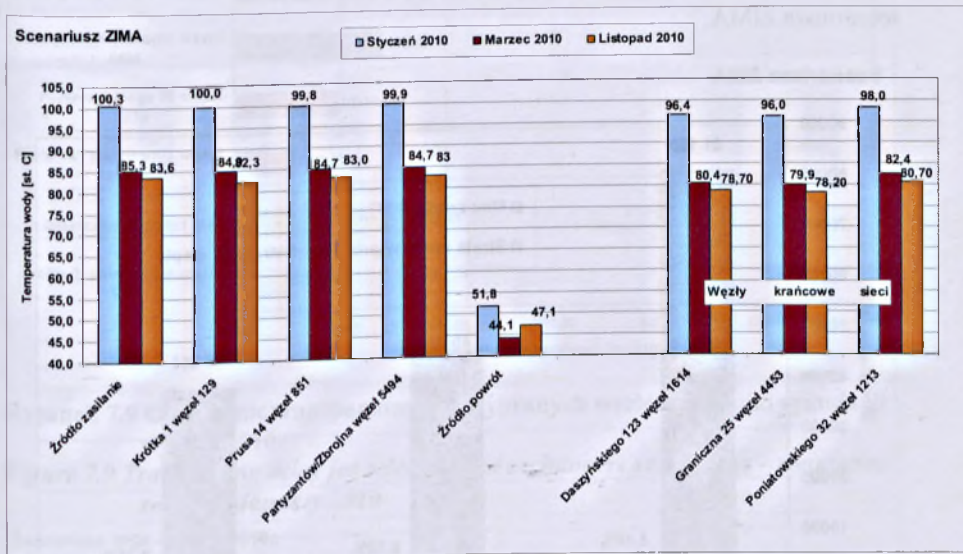


Figure 7.6 Graph of the district heating network

Dla powyżej wymienionych punktów na grafie sieci ciepłowniczej prowadzono analizę zmian temperatury wody i wartości opóźnienia transportowego, czyli czasu dopłynięcia wody od źródła do węzła grafu. Dla każdego z wariantu porównano także moc źródła i straty ciepła w systemie ciepłowniczym.

Na kolejnych rys. 7.7 i 7.8 przedstawiono wyniki symulacji pracy systemu ciepłowniczego bez rozproszonych zasobników ciepła.



Rysunek 7.7 Temperatura wody ciepłowniczej w wybranych węzłach sieci – wyniki symulacji – scenariusz ZIMA

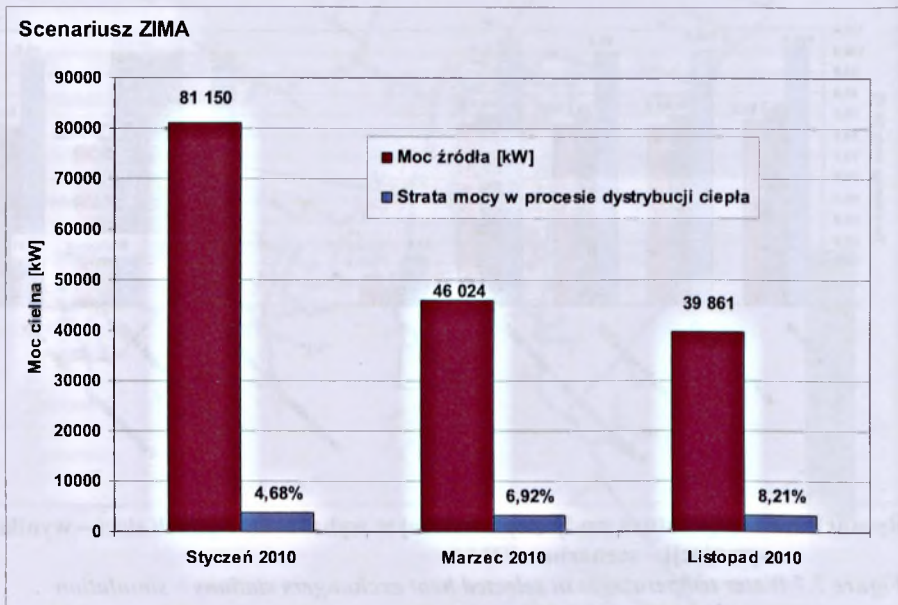
Figure 7.7 Water temperatures in selected heat exchangers stations – simulation results – winter scenario

Różnicę między wartościami temperatury wody opuszczającej źródło ciepła a temperaturą wody w wybranym węźle grafu nazwano wychłodzeniem. Największe wychłodzenie wody sieciowej zauważalne jest na drodze źródło ciepła – węzeł ciepłowniczy przy ul. Granicznej 25. Dla symulacji w oparciu o dane ze stycznia 2010r. wynosi ono 4,3 °C. Najmniejsze wychłodzenie na poziomie 0,3 °C odnotowano dla drogi: źródło ciepła-węzeł ciepłowniczy przy ul. Krótkiej 1. Temperatura wody powracającej do źródła wynosiła 51,8 °C, co odpowiada różnicy temperatury zasilanie – powrót 48,5 °C.

Dla pozostałych dwóch wariantów symulacji wartości różnic temperatury kształtują się następująco.

W marcu i w listopadzie największe wychłodzenie także wystąpiło na odcinku: źródło ciepła – węzeł ciepłowniczy przy ul. Granicznej 25 i wyniosło w obu miesiącach 5,4 °C. Temperatura wody powrotnej do źródła wynosiła 44,1 °C w marcu, co odpowiada różnicy temperatur dla całej sieci 41,2 °C. W listopadzie temperatura wody powrotnej plasowała się na poziomie 47,1 st. °C co odpowiada $\Delta t = 36,5$ °C.

Na rys. 7.8 przedstawiono moc źródła i stratę mocy w procesie dystrybucji ciepła dla scenariusza ZIMA.

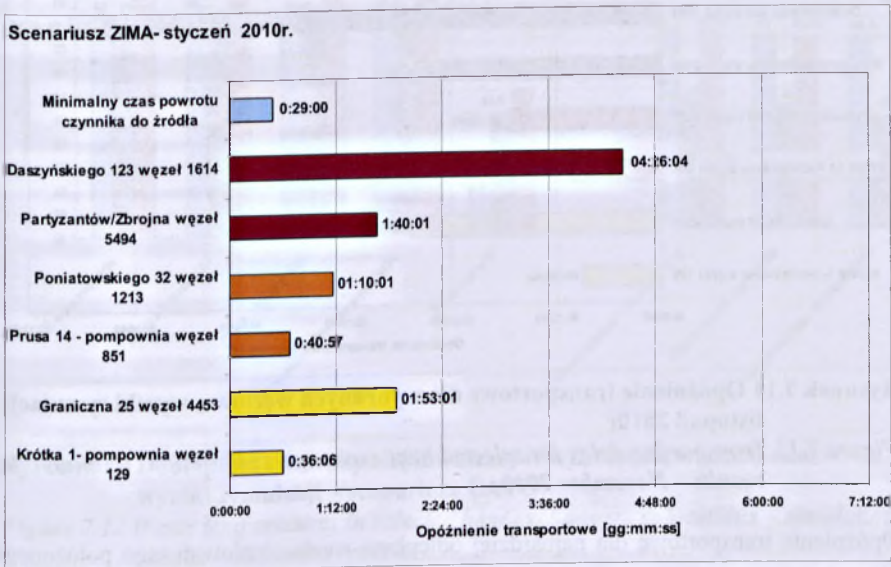


Rysunek 7.8 Moc źródła i strata w systemie ciepłowniczym w procesie dystrybucji – wyniki symulacji – scenariusz ZIMA

Figure 7.8 Power plant capacity and factors of heat power losses during heat transportation process by district heating network – simulation results – winter scenario

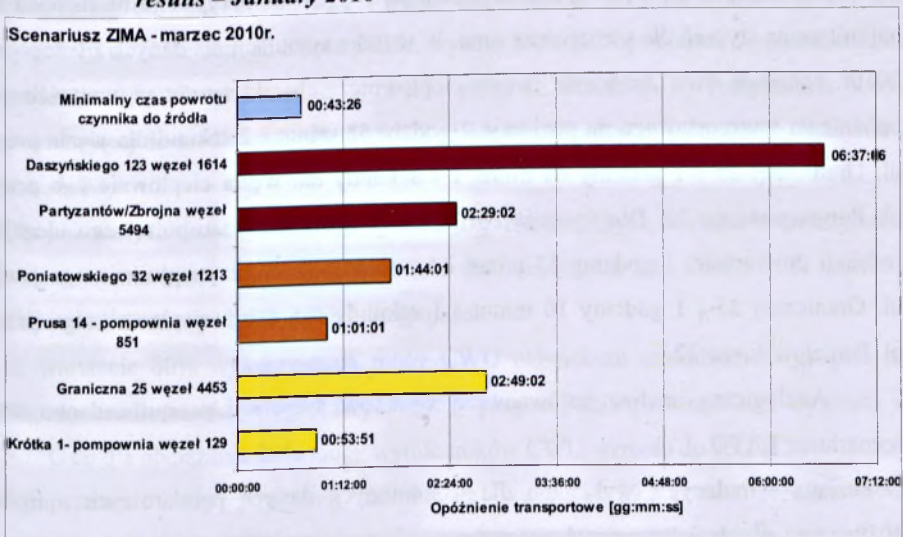
Straty powstające w procesie dystrybucji wahają się w zakresie od 4,68% do 8,21% co stanowi poziom właściwy dla miesięcy sezonu grzewczego. Wartość względna strat jest związana z wolumenem sprzedaży, jaki został osiągnięty w analizowanym miesiącu pracy systemu ciepłowniczego a był związany bezpośrednio z warunkami atmosferycznymi.

Rys. 7.9, 7.10 i 7.11 przedstawiają zakres zmienności wartości opóźnienia transportowego dla wybranych węzłów grafu, tj. punktów charakterystycznych sieci ciepłowniczej dla scenariusza ZIMA.



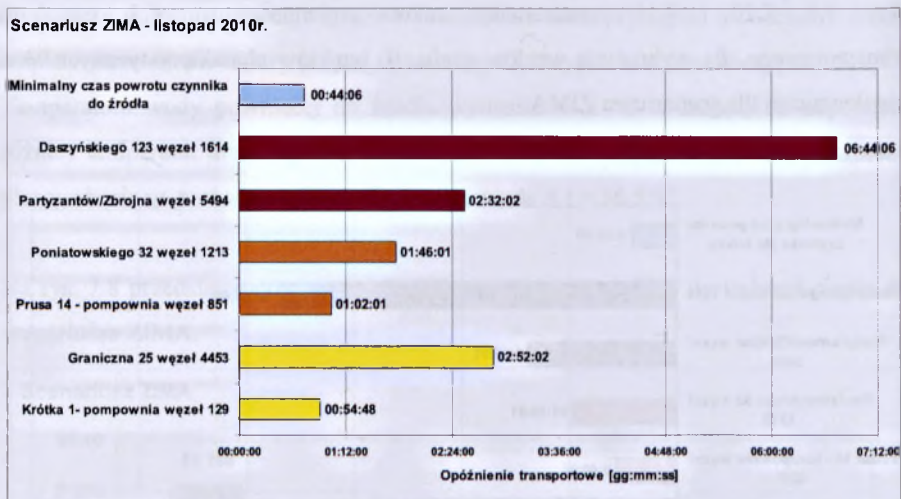
Rysunek 7.9 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji styczeń 2010r

Figure 7.9 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – January 2010



Rysunek 7.10 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji marzec 2010r

Figure 7.10 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – March 2010



Rysunek 7.11 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji listopad 2010r

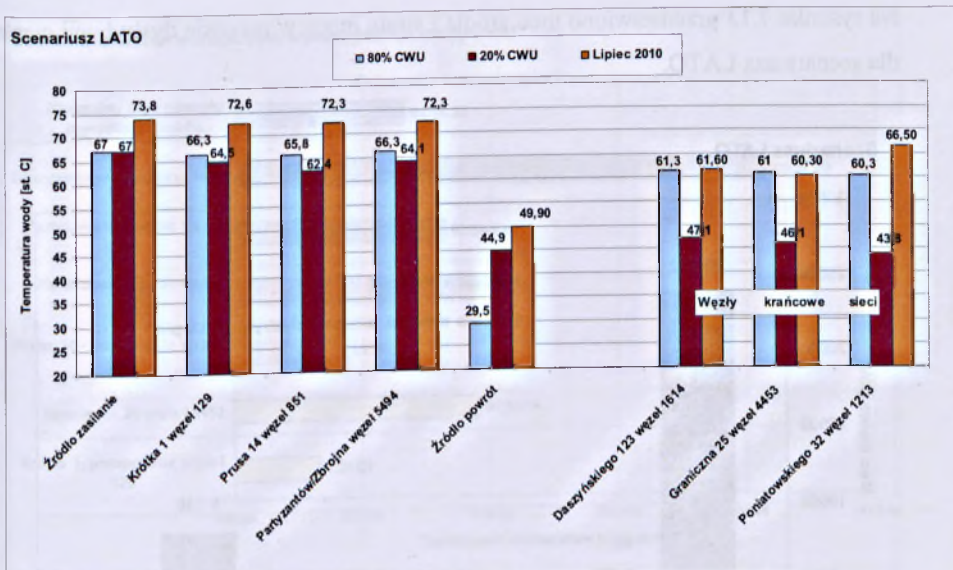
Figure 7.11 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – November 2010

Opóźnienie transportowe dla najbardziej odległego węzła ciepłowniczego położonego przy ul. Daszyńskiego 123 waha się w zakresie od 4 godzin 26 minut i 4 sekund w styczniu do 6 godzin 44 min i 6 sekund w listopadzie. W analizowanych punktach najdłuższe czasy dopłynięcia wody ze źródła do węzłów są przypadają na listopad a najkrótsze na styczeń dla scenariusza zima. W wyniku symulacji dla danych z listopada 2010r. pozostałe dwa „krańcowe” węzły ciepłownicze charakteryzują się wartościami opóźnienia transportowego na poziomie 2 godzin 52 minut i 2 sekund dla węzła przy ul. Granicznej 25 i 1 godziny 46 minut i 1 sekundy dla węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32. Dla stycznia 2010r. czasy opóźnienia transportowego ulegają redukcji do wartości 1 godziny 53 minut i 1 sekundy dla węzła ciepłowniczego przy ul. Granicznej 25 i 1 godziny 10 minut i 1 sekundy dla węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32.

Analogiczną analizę porównawczą wyników symulacji przeprowadzono dla scenariusza LATO.

Obliczenia symulacyjne wykonano dla uśrednionych danych pomiarowych z lipca 2010r. oraz dla dwóch wariantów teoretycznych: współczynnika wykorzystania mocy wymienników CWU na poziomie 80% i 20%.

Na rys. 7.12 zaprezentowano otrzymane wyniki.



Rysunek 7.12 Temperatura wody ciepłowniczej w wybranych węzłach sieci – wyniki symulacji – scenariusz LATO

Figure 7.12 Water temperatures in selected heat exchangers substations – simulation results – summer scenario

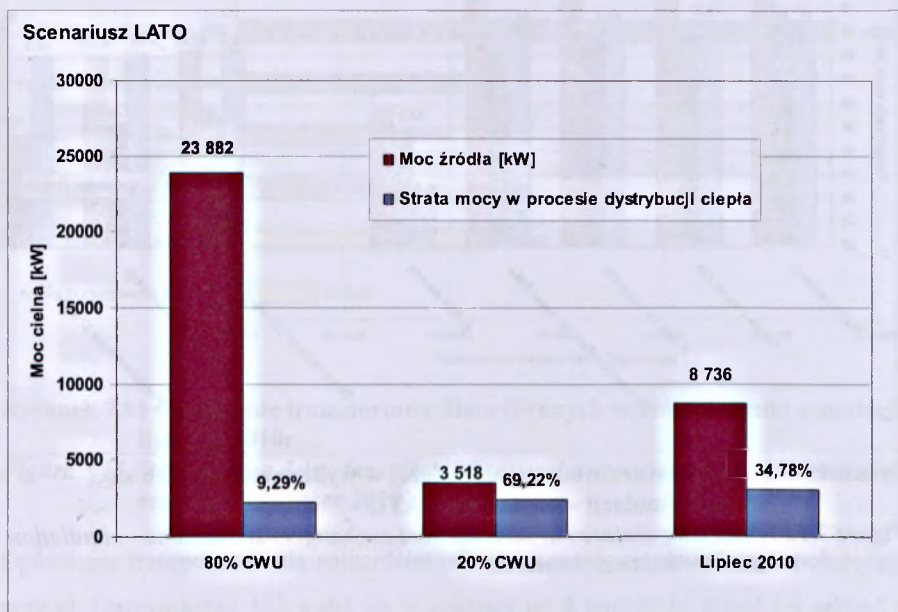
Podobnie jak dla scenariusza ZIMA największe schłodzenie wody ciepłowniczej ma miejsce na odcinku: źródło ciepła-węzeł ciepłowniczy przy ul. Granicznej 25. Dla symulacji na bazie danych z lipca 2010r. wynosi 13,5 °C. Najmniejsze wychłodzenie na poziomie 0,1,2°C odnotowano w węźle przy ul. Krótkiej 1. Temperatura wody powracającej do źródła wynosiła 49,9 °C, co odpowiada różnicy temperatury zasilanie – powrót 23,9 °C.

Dla pozostałych dwóch wariantów symulacji tj. dla przyjętych wartości współczynnika wykorzystania mocy wymienników CWU dla scenariusza lato 80% i 20% wartości różnicy temperatury kształtują się następująco.

W wariacie 80% wykorzystania mocy CWU największe schłodzenie wystąpiło na odcinku źródło ciepła – węzeł ciepłowniczy przy ul. Poniatowskiego 32 i wyniosło w 6,7 °C co dla obciążenia 20% mocy wymienników CWU wzrosło do 23,2 °C.

Temperatura wody powrotnej do źródła wynosiła 29,5°C w wariacie 80% wykorzystania mocy CWU co odpowiada różnicy temperatury dla całej sieci 37,5 °C. W wariacie 20% wykorzystania mocy CWU temperatura wody powrotnej uplasowała się na poziomie 44,9 °C co odpowiada różnicy temperatury dla całej sieci $\Delta t = 22,1$ °C.

Na rysunku 7.13 przedstawiono moc źródła i stratę mocy w procesie dystrybucji ciepła dla scenariusza LATO.



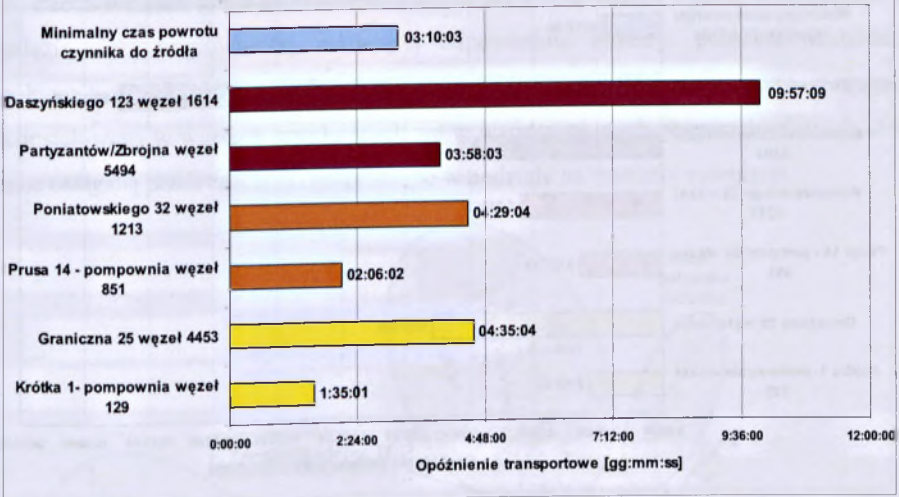
Rysunek 7.13 Moc źródła i strata w systemie ciepłowniczym w procesie dystrybucji – wyniki symulacji – scenariusz LATO

Figure 7.13 Power plant capacity and factors of heat power losses during heat transportation process by district heating network – simulation results – summer scenario

Straty powstające w procesie dystrybucji wahają się w zakresie 9,29% aż do 69,22%. Są to wartości spotykane podczas eksploatacji niedociążonych i przewymiarowanych systemów ciepłowniczych. Wartość względna strat jest związana z wolumenem sprzedaży, jaki został osiągnięty w analizowanym wariantcie pracy systemu ciepłowniczego. Dlatego dla 20% wykorzystania mocy wymienników CWU straty względne osiągnęły tak wysoki poziom blisko 70%.

Rys. 7.14, 7.15 i 7.16 ilustrują zakres zmienności wartości opóźnienia transportowego dla wybranych węzłów grafu, tj. punktów charakterystycznych sieci ciepłowniczej dla scenariusza LATO.

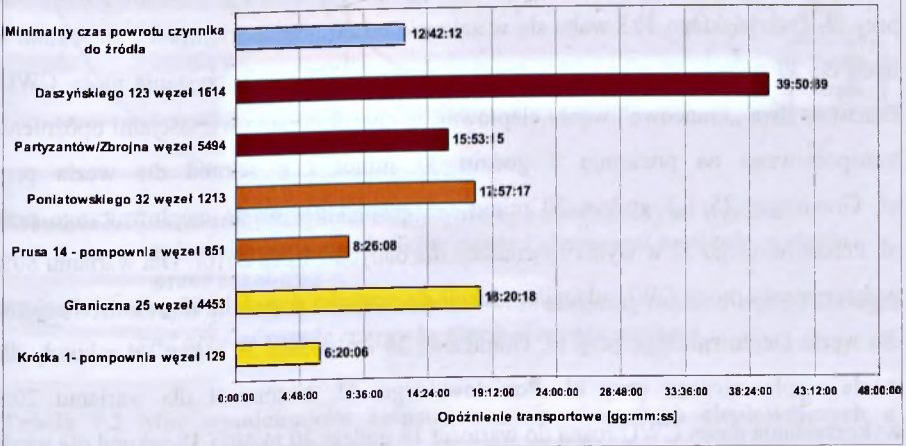
Scenariusz LATO- wariant 80% wykorzystania mocy CWU



Rysunek 7.14 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji dla 80% wykorzystania mocy wymienników CWU

Figure 7.14 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – for power tap water utilization factor 80%

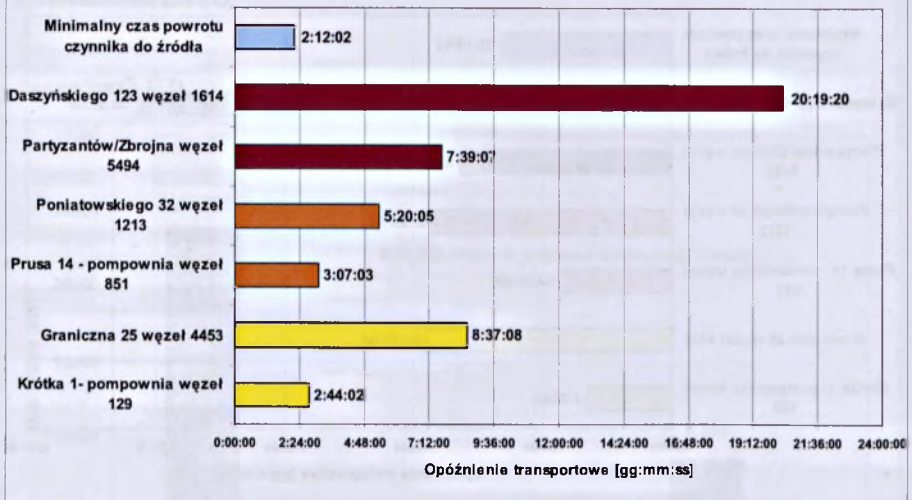
Scenariusz LATO- wariant 20% wykorzystania mocy CWU



Rysunek 7.15 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji dla 20% wykorzystania mocy wymienników CWU

Figure 7.15 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – for power tap water utilization factor 20%

Scenariusz LATO- lipiec 2010r.



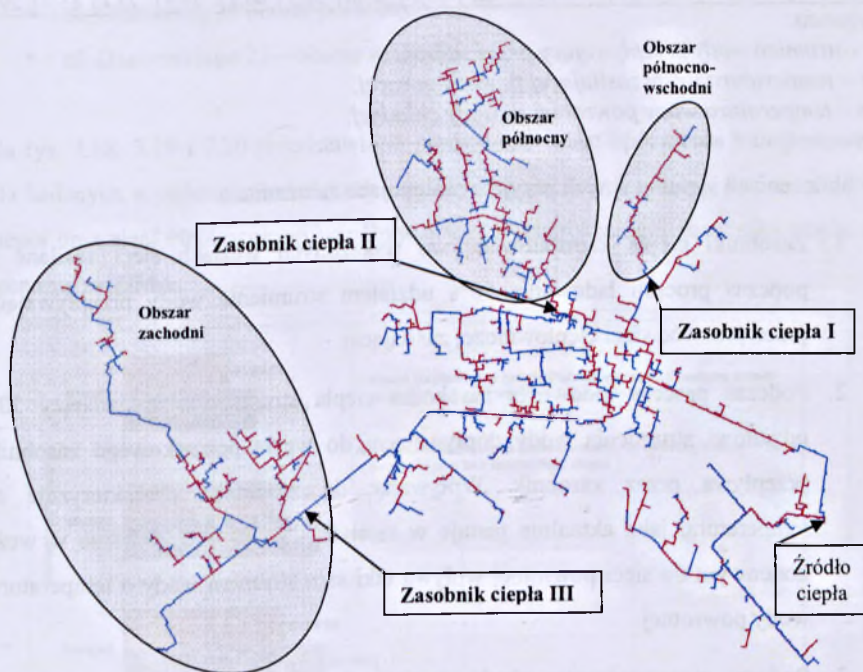
Rysunek 7.16 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji lipiec 2010r

Figure 7.16 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – July 2010

Opóźnienie transportowe dla najbardziej odległego węzła ciepłowniczego położonego przy ul. Daszyńskiego 123 waha się w zakresie od 20 godzin 19 minut i 20 sekund w lipcu do 39 godzin 50 min i 39 sekund w wariacie 20% wykorzystania mocy CWU. Pozostałe dwa „krańcowe” węzły ciepłownicze charakteryzują wartościami opóźnienia transportowego na poziomie 8 godzin 37 minut i 8 sekund dla węzła przy ul. Granicznej 25 i 5 godzin 20 minut i 5 sekund dla węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32 w wyniku symulacji dla danych z lipca 2010r. Dla wariantu 80% wykorzystania mocy CWU ulegają redukcji do wartości 4 godzin 35 minut i 4 sekund dla węzła ciepłowniczego przy ul. Granicznej 25 i 4 godzin 29 minut i 4 sekundy dla węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32. Natomiast dla wariantu 20% wykorzystania mocy CWU rosną do wartości 18 godzin 20 minut i 18 sekund dla węzła przy ul. Granicznej 25 i 17 godzin 57 minut i 17 sekund dla węzła przy ul. Poniatowskiego 32.

7.3 Omówienie wyników obliczeń symulacyjnych

W trzech węzłach grafu zainstalowano zasobniki ciepła. Każdy z nich współpracuje z gałęzią sieci ciepłowniczej zasilającej odpowiednio obszary: północno-wschodni, północny oraz zachodni (rys. 7.17). W tab. 7.2 zamieszczono dane prezentujące moc zainstalowaną w węzłach znajdujących się w wyodrębnionych obszarach a w tab. 7.3 moc osiąganą przez zasobniki rozproszone w podziale na warianty symulacji.



Rysunek 7.17 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej z zaznaczonymi węzłami zainstalowania zasobników ciepła i obszarami zasilania w ciepło przez zasobniki

Figure 7.17 Graph of district heating network with installing thermal energy storages and area of supply energy by thermal energy storages

Tabela 7.2 Moc wymienników zainstalowanych w węzłach ciepłowniczych z podziałem na obszary

Table 7.2 Installed heat exchange capacity in substations in areas

Cel	Moc wymienników ciepła zasilanych w węzłach ciepłowniczych [kW]		
	Obszar północno-wchodni	Obszar północny	Obszar zachodni
CO	5 188	25 484	20 351
CWU	670	7 520	7 408
CO+CWU	5 858	33 003	27 759

Tabela 7.3. Moce zasobników ciepła osiągnięte w poszczególnych wariantach pracy

Table 7.3 Power of thermal energy storages for different variants

	Moc [kW]			Zasobnik ciepła I			Zasobnik ciepła II			Zasobnik ciepła III		
	Zasobnik ciepła I	Zasobnik ciepła II	Zasobnik ciepła III	m	Tz	Tp	m	Tz	Tp	m	Tz	Tp
	kW	kW	kW	l/s	°C	°C	l/s	°C	°C	l/s	°C	°C
Styczeń	1 929	10 991	9 197	10,3	99,5	51,9	58,1	99,9	51,9	48,8	99,5	51,6
Marzec	1 082	6 222	5 178	6,9	84,4	44,4	38,9	84,9	44,3	32,6	84,3	44,0
Listopad	936	5 379	4 485	6,8	82,7	47,6	38,3	83,2	47,5	32,1	82,7	47,2
Lipiec	294	3 219	3 127	2,0	65,1	27,8	22,5	66,3	29,9	22,1	65,7	29,8

Legenda:

m - strumień wody przepływający przez zasobnik,

Tz - temperatura wody zasilającej tj. wody gorącej,

Tp - temperatura wody powrotnej tj. wody chłodnej.

W obliczeniach symulacyjnych przyjęto następujące założenia.

1. Zasobniki ciepła zainstalowane we wskazanych węzłach sieci zasilane są podczas procesu ładowania 50% udziałem strumienia wody przepływającej przez przewód sieci ciepłowniczej zasilającej.
2. Podczas procesu ładowania zasobnika ciepła strumień odpowiadający 50% udziałowi strumienia wody dopływającej do węzła początkowego zasobnika przepływa przez zasobnik. Wpływając do zasobnika charakteryzuje się temperaturą, jaka aktualnie panuje w sieci zasilającej. Jednocześnie w węźle końcowym do sieci powrotnej wpływa taki sam strumień wody o temperaturze wody powrotnej.
3. Podczas magazynowania ciepła przyjęto, że w zasobniku temperatura wody zarówno gorącej jak i chłodnej obniżą się do poziomu temperatury wody zasilającej i powrotnej w sieci ciepłowniczej występującej podczas procesu rozładowania zasobnika. Dla okresu zimowego są to różnice w wysokości od 0,1°C do 1 °C. Dla okresu lata gdzie okres magazynowania ciepła wydłuża się spadek temperatury osiąga 2 °C. Przyjęcie takiego założenia uwzględnia w obliczeniach wychłodzenie zasobników.

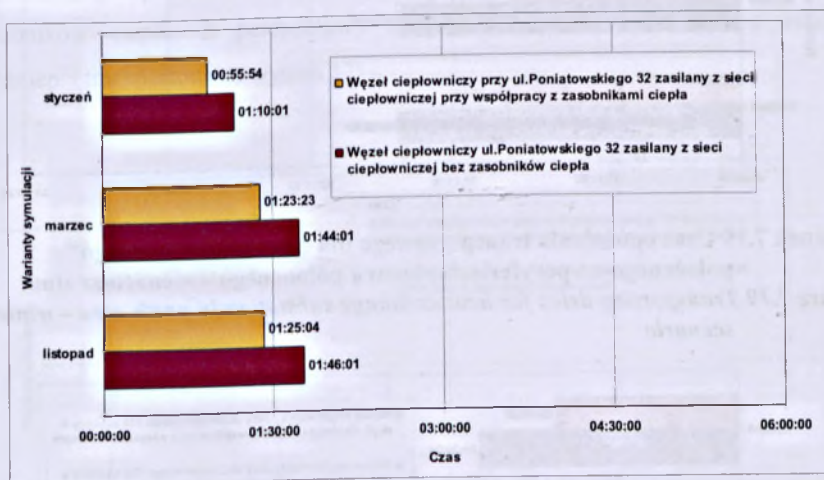
Obliczenia symulacyjne wykonano dla sześciu zdefiniowanych wcześniej wariantów.

Dyskusję nad wynikami obliczeń ograniczono do analizy dwóch parametrów określających wpływ pracy rozproszonych zasobników ciepła na parametry pracy sieci ciepłowniczej.

Pierwszy to opóźnienie transportowe, czyli czas, w jakim woda czyli nośnik ciepła opuszczający źródło dołączy do węzła ciepłowniczego. Badania przeprowadzono porównując czas opóźnienia transportowego dla trzech najbardziej odległych węzłów ciepłowniczych położonych na peryferiach sieci ciepłowniczej. Są to węzły ciepłownicze przy (rys. 7.17):

- ul. Poniatowskiego 32 – obszar północno-wschodni,
- ul. Granicznej 25 obszar północny,
- ul. Daszyńskiego 23 – obszar zachodni.

Na rys. 7.18, 7.19 i 7.20 przedstawiono porównanie czasu opóźnienia transportowego dla badanych węzłów ciepłowniczych zasilanych z sieci ciepłowniczej bez zasobników ciepła oraz sieci ciepłowniczej współpracującej z rozproszonymi zasobnikami ciepła dla scenariusza ZIMA.



Rysunek 7.18 Czasy opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północno-wschodniego – scenariusz zima

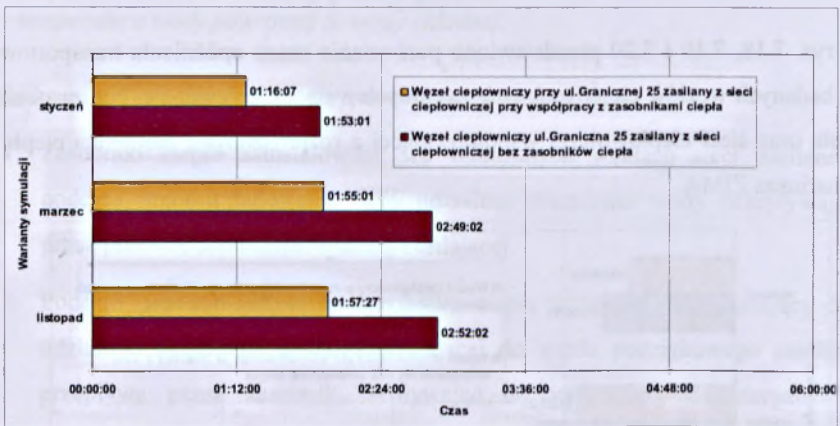
Figure 7.18 Transporting delay for heat exchange substation in north-east area – winter scenario

Dla wariantów w scenariuszu ZIMA gdzie współpraca rozproszonych zasobników ciepła z sieci ciepłowniczą przekłada się na dwa stany pracy- procesy.

Proces ładowania – następuje w okresie zmniejszonych odbiorów ciepła przez węzły ciepłownicze a wówczas zasobnik staje się dodatkową odbiorcą.

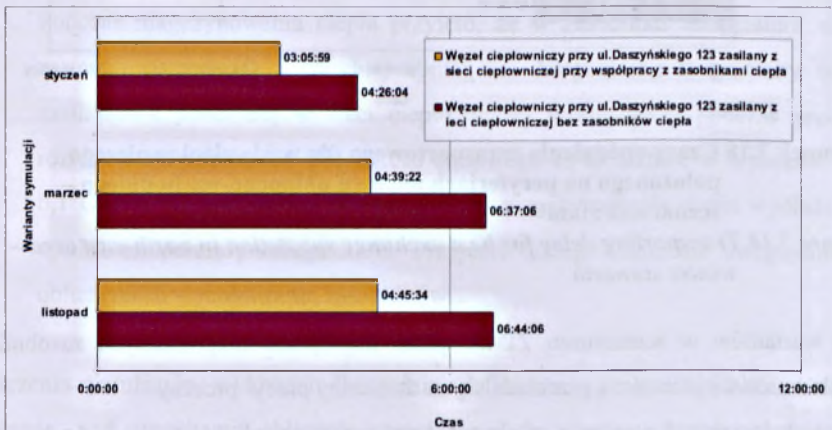
Proces rozładowywania – następuje, gdy węzły ciepłownicze odbierają z sieci zwiększoną ponad wartość średnią ilość ciepła. Wówczas zasobniki współpracują z siecią, jako dodatkowe źródła ciepła uzupełniające źródło podstawowe.

Z perspektywy czasu dostawy ciepła, czyli czasu opóźnienia transportowego widoczna jest redukcja 20% czasu w przypadku węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32. W przypadku węzła ciepłowniczego przy ul. Granicznej 25 wzrasta do 32% a dla węzła ciepłowniczego przy ul. Daszyńskiego 123 ograniczenie opóźnienia transportowego plasuje się na poziomie 29-30% (rys. 7.19 i 7.20)



Rysunek 7.19 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północnego – scenariusz zima

Figure 7.19 Transporting delay for heat exchange substation in north area – winter scenario

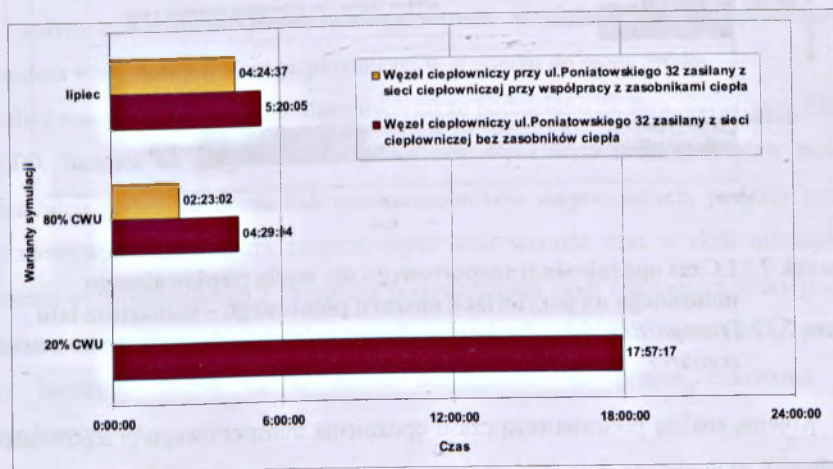


Rysunek 7.20 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru zachodniego – scenariusz zima

Figure 7.20 Transporting delay for heat exchange substation in west area – winter scenario

W scenariuszu LATO rozproszone zasobniki ciepła w okresach zwiększonego zapotrzebowania na ciepło pracują, jako lokalne źródła ciepła. Wówczas czas opóźnienia transportowego dla węzłów ciepłowniczych położonych na krańcach sieci ciepłowniczej znacząco maleją.

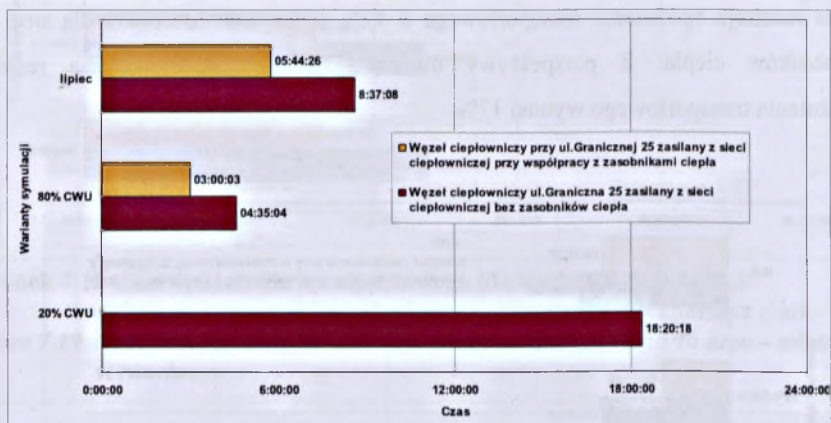
Na rys. 7.21 przedstawiono porównanie czasu opóźnienia transportowego dla obszaru północno-wschodniego. Czas dla węzła ciepłowniczego przy ul. Poniatowskiego 32 dla 20% wykorzystania mocy wymienników CWU sięga poziomu 18 godzin. Przy takim obciążeniu cieplnym sieci następuje proces ładowania zasobników rozproszonych. W szczytach poboru CWU, czyli przy 80% wykorzystaniu mocy wymienników CWU rozproszone zasobniki ciepła przejmują rolę źródeł lokalnych i zasilają odbiorców ciepła położonych za zasobnikiem licząc od źródła ciepła. W takim układzie czas opóźnienia transportowego spada do wartości 2 godzin, 23 minut i 2 sekund. Jest to także redukcja opóźnienia transportowego o 47% w stosunku do czasu dla sieci bez zasobników ciepła. Z perspektywy miesiąca lipca średniomiesięczna redukcja opóźnienia transportowego wynosi 17%.



Rysunek 7.21 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północno-wschodniego – scenariusz lato

Figure 7.21 Transporting delay for heat exchange substation in north-east area – summer scenario

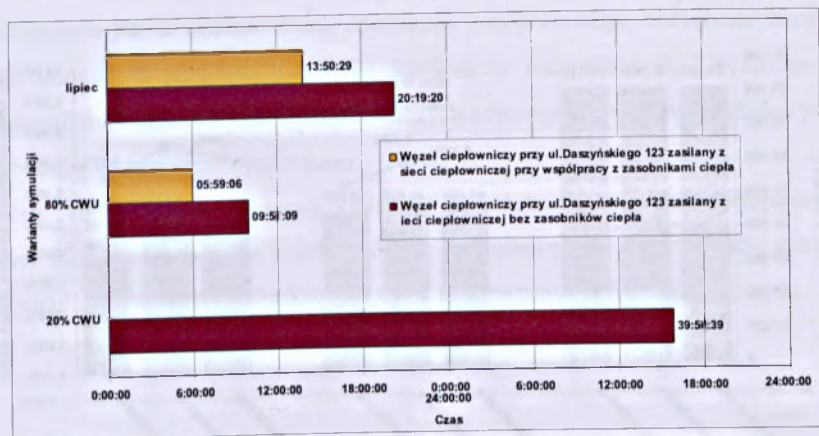
Na rys. 7.22 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych dla obszaru północnego, w którym węzłem zidentyfikowanym, jako najbardziej odległy od źródła ciepła jest węzeł ciepłowniczy przy ul. Granicznej 25. Czas opóźnienia transportowego dla wspomnianego węzła przy 20 % obciążeniu wymienników CWU wynosi 18 godzin, 20 minut i 18 sekund. Przy wykorzystaniu mocy wymienników w 80% czas opóźnienia transportowego wynosi dla sieci bez zasobników 4 godziny, 35 minut i 4 sekundy. W układzie zasilania wyłącznie z zasobnika ciepła ulega 35% redukcji i spada do poziomu 3 godzin. Uśredniając dane dla pracy skali miesiąca lipca czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego przy ul Granicznej 25 zasilanego z sieci ciepłowniczej wyposażonej w rozproszone zasobniki ciepła wynosi 5 godzin, 44 minuty i 26 sekund. Jest on krótszy o 33% w stosunku do czasu opóźnienia transportowego dla węzła zasilanego przez sieć ciepłowniczą bez rozproszonych zasobników ciepła.



Rysunek 7.22 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północnego – scenariusz lato

Figure 7.22 Transporting delay for heat exchange substation in north area – summer scenario

Kolejną analizę porównawczą czasu opóźnienia transportowego przeprowadzono dla obszaru zachodniego. Dla 80% obciążenia wymienników CWU obszar ten zasilany jest z zasobnika ciepła III, co w efekcie powoduje redukcję czasu opóźnienia transportowego do 5 godzin, 59 minut i 6 sekund z 10 godzin, czyli o 40%. Porównanie wartości średniomiesięcznych odniesionych do lipca 2010 wykazało redukcją czasu opóźnienia transportowego na poziomie 32% do 13 godzin, 50 minut i 29 sekund. Omówione dane liczbowe prezentuje rys. 7.23.

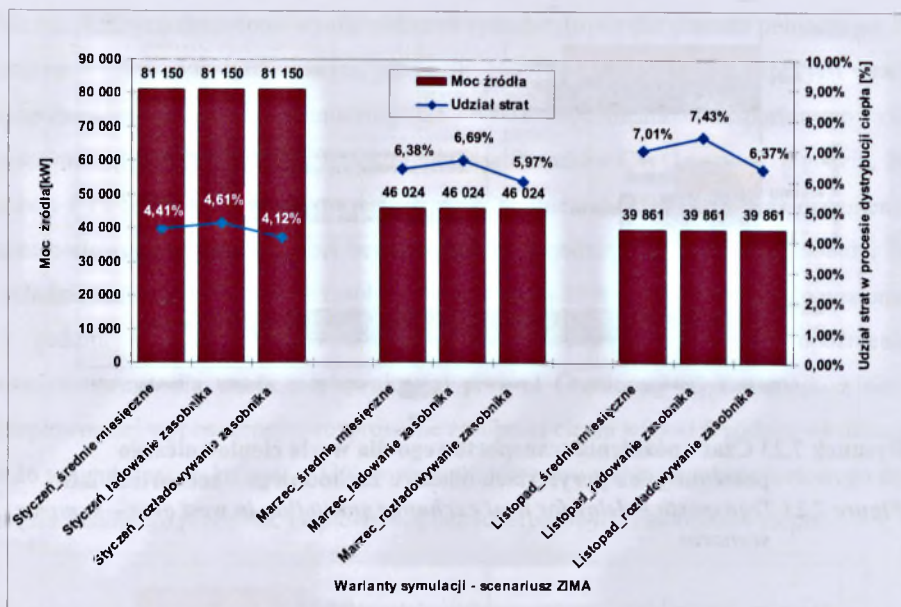


Rysunek 7.23 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru zachodniego – scenariusz lato
Figure 7.23 Transporting delay for heat exchange substation in west area – summer scenario

Drugim czynnikiem analizowanym, jako wskaźnik wpływu rozproszonych zasobników ciepła na pracę sieci ciepłowniczego są straty w procesie dystrybucji ciepła przez sieć ciepłowniczą. Analizowano wyniki symulacji dla 6 wariantów. Straty ciepła w każdym z wariantów przeliczono na wartość względną wyrażoną procentowym udziałem straty mocy w sieci ciepłowniczego w stosunku do mocy źródła.

Analizę wyników obliczeń symulacyjnych także podzielono na dwa scenariusze ZIMA i LATO. Bazując na danych średniomiesięcznych porównano udział strat w procesie dystrybucji podczas procesu ładowania zasobników rozproszonych, podczas procesu rozładowywania zasobników rozproszonych oraz wartość strat w skali miesiąca dla systemu współpracującego z zasobnikami rozproszonymi czyli obejmującą straty podczas ładowania, rozładowywania jak i pracy sieci ciepłowniczego bez zasobników tj. podczas gdy zasobniki ciepła są w stanie oczekiwania na proces ładowania bądź rozładowywania.

Na rys. 7.24 przedstawiono przebieg zmian udziału strat w odniesieniu do mocy źródła dla miesięcy scenariusza ZIMA. Największy udział strat zaobserwowano w listopadzie. Udział strat waha się od 7,43% podczas procesu ładowania zasobników do 6,37% podczas procesu rozładowywania. Wartość średniomiesięczna na poziomie 7,01% jest wartością o blisko 1% niższą od średniomiesięcznych strat dla sieci bez zasobników ciepła (rys. 7.8)



Rysunek 7.24 Moc źródła ciepła i udział strat w procesie dystrybucji ciepła – scenariusz zima

Figure 7.24 Power of the heating plant and losses during distribution of heat – winter scenario

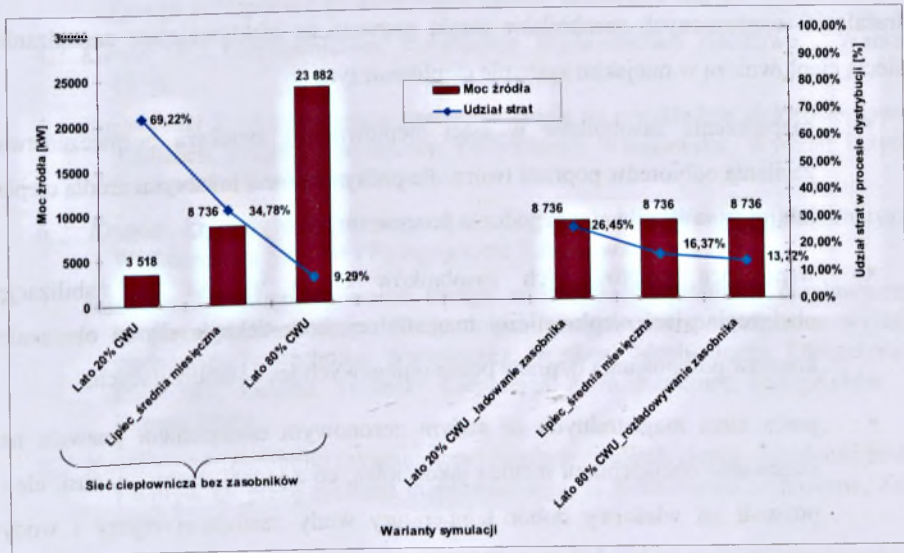
Pozostałe dwa warianty symulacji dla danych bazowych ze stycznia 2010r. i marca 2010r. wskazują na redukcję udziału strat w procesie dystrybucji dla sieci współpracującej z rozproszonymi zasobnikami ciepła w porównaniu do udziału strat dla sieci bez zasobników ciepła.

Dla wariantu symulacji miesiąca stycznia udział strat waha się od 4,61% do 4,12%. Średniomiesięcznie utrzymuje się na poziomie 4,41% co w odpowiada wartości 4,68% dla sieci ciepłowniczej bez zainstalowanych zasobników ciepła. Symulacja dla marca także potwierdza tą zależność. Proces ładowania zasobników podwyższa udział strat do poziomu 6,69%, aby w procesie rozładowywania spadł do 5,97%. Wartości średniomiesięczne pracy sieci ciepłowniczej z rozproszonymi zasobnikami ciepła charakteryzuje udział strat na poziomie 4,41% a sieć ciepłowniczą bez zainstalowanych zasobników ciepła 6,92%.

Na rys. 7.25 przedstawiono przebieg zmian udziału strat w procesie dystrybucji w odniesieniu do mocy źródła dla scenariusza LATO. W obliczeniach oparto się na danych z miesiąca lipiec 2010 r, oraz dwóch wariantach 80% i 20% wykorzystania mocy wymienników CWU.

Analogicznie jak w analizie czasu opóźnienia transportowego, obciążenie sieci 20% CWU odpowiada okresowi ładowania zasobników rozproszonych. Obciążenie 80% wymienników CWU w węzłach ciepłowniczych odpowiada procesowi rozładowywania zasobników w sieci ciepłowniczej.

W celu zobrazowania istotnych zmian w parametrach pracy sieci ciepłowniczej na rys. 7.25 porównano moc źródła i udziały procentowe strat dla wariantów symulacji sieci ciepłowniczej bez zasobników ciepła i z rozproszonymi zasobnikami ciepła.



Rysunek 7.25 Moc źródła ciepła i udział strat w procesie dystrybucji ciepła – scenariusz lato

Figure 7.25 Power of the heating plant and losses during distribution of heat – summer scenario

Dla systemu ciepłowniczego bez zasobników ciepła udział strat ciepła średniomiesięcznie wynosi 34,78%. W okresach minimalnej sprzedaży tj. dla 20% obciążenia wymienników CWU osiąga poziom rzędu 70%, natomiast przy intensywnym tj. 80% wykorzystaniu mocy CWU spada do 9,29%.

Współpraca sieci ciepłowniczej z rozproszonymi zasobnikami ciepła zmniejsza tak dużą amplitudę wielkości udziału strat w procesie dystrybucji. Stabilizując pracę źródła na średniomiesięcznym poziomie 8736 MW sprowadza udział strat do wartości 16,37% w skali miesiąca. W trakcie ładowania zasobników ciepła udział strat wzrasta o 10% do wartości 26,45% natomiast podczas rozładowywania maleje do 13,72%.

8. Podsumowanie

W pracy udowodniono, że stosowanie zasobnika ciepła bądź zasobników ciepła zainstalowanych w pewnej odległości od źródła ciepła wpływają na redukcję czasu opóźnienia transportowego i minimalizują względne straty ciepła w stosunku do wartości, jakimi charakteryzuje się sieć ciepłownicza nieposiadająca w swojej strukturze zasobnika ciepła bądź zasobników.

Instalacja rozproszonych zasobników ciepła pozwala na efektywniejsze zarządzanie siecią ciepłowniczą w miejskim systemie ciepłowniczym:

- rozproszenie zasobników w sieci ciepłowniczej zwiększa bezpieczeństwo zasilania odbiorców poprzez tworzenie podsystemów z lokalnymi źródłami ciepła jakimi są zasobniki ciepła podczas procesu rozładowywania,
- współpraca rozproszonych zasobników ciepła wpływa na stabilizację obciążenia sieci ciepłowniczej magistralnej, co przekłada się na obniżenie kosztów pompowania tj. pracy pomp obiegowych jak i stabilizujących,
- praca sieci magistralnych ze stałym sezonowym obciążeniem pozwala na sterowanie obciążeniami metodą jakościową, co z jednej strony wymusi, ale i pozwoli na właściwy dobór temperatury wody zasilającej rejonu i wody powrotnej a to z kolei przekłada się na redukcję strat ciepła w sieci magistralnej.

Bibliografia

1. *Borkowski J.*: Techniczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania sieci ciepłowniczej jako zasobnika ciepła w Przedsiębiorstwie Energetycznym w Siedlcach Sp z o.o., Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, praca dyplomowa, studia zaoczne, Warszawa, 2004r.
2. *Deo N.*: Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. PWN, 1980r.
3. *Jędral W.*: Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych, Krajowa Agencja Poszanowania Energii Polski Program Efektywnego Wykorzystania Energii w Napędach Elektrycznych PEMP, Warszawa 2007r.
4. *Kamler W.*: Ciepłownictwo, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979r.
5. *Kazimierski S.*: Analiza pracy zasobnika ciepła na przykładzie elektrociepłowni w Siedlcach, Projekt przejściowy, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2003r.
6. *Krygier K., Klinke T., Sewerynik J.*: Ogrzewnictwo Wentylacja Klimatyzacja, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne S.A., Warszawa 1991r.
7. *Kwestarz M.*: Magazynowanie energii w miejskich systemach ciepłowniczych, konferencja Ekologiczne Technologie Energetyczne połączona z wyjazdem studyjnym, Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyczny i Lotnictwa, Instytut Techniki Ciepłej i Koło Naukowe Energetyków PW, Europa 2006r.
8. *Kwestarz M.*: Zasobniki (akumulatory) ciepła w źródłach ciepła- zasadność budowy i wpływ na pracę systemu ciepłowniczego, II Konferencja techniczna, Zegrze 2009r.
9. *Lichota J.*: Metoda analizy akumulacji energii cieplnej w sieci ciepłowniczej – Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 3, 2001r.
10. *Margolis A.E.*: Pimlico district-heating scheme – Journal of Institution of Heating and Ventilating Engineers, 1951r.
11. *Mańkowski S.*: Wymiana ciepła przy konwekcji wymuszonej i swobodnej w wymienniku pojemnościowo-przepływowym, Prace Naukowe Budownictwo nr 44, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976r.
12. *Mańkowski S, Kwestarz M.*: Analiza funkcjonalna i ekonomiczna pracy zasobnika ciepła w systemie ciepłowniczym miasta Siedlce współpracującego z układem turbin gazowych, Uczelniane Centrum Badawcze Energetyki i Ochrony Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001r.
13. *Mańkowski S., Kwestarz M.*: Centralne zasobniki ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych, V Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje 2001r.
14. *Miecznikowski J* Vattenfall: Bezpieczniej z akumulatorem ciepła, Nowa energia 3/2009r.
15. *Misiewicz W., Misiewicz A.*: Napędy regulowane w układach pompowych źródeł ciepła, Krajowa Agencja Poszanowania Energii Polski Program Efektywnego Wykorzystania Energii w Napędach Elektrycznych PEMP, Warszawa 2008r.

16. *Nawrot H.*: Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania akumulatora ciepła w układzie wody grzewczej w Z.A. „Kędzierzyn” - Gospodarka paliwami i energią, 1/1998r.
17. *Niemyski O.*: Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2000r.
18. *Ochęduszek S.*: Teoria maszyn cieplnych, część trzecia- Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1955r.
19. *Olszak J.*: Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2003r.
20. *Osiadacz A.J.*: Statyczna symulacja sieci gazowych. Warszawa 2001r.
21. *Osiadacz A.J.*: Symulacja sieci - wykłady dla IV roku specjalności Inżynieria Gazownictwa Wydziału IŚ PW.
22. *Osiadacz A.J., Kwętarz M.*: „Komputerowa symulacja pracy sieci ciepłowniczej jako element wsparcia decyzji operatora”, III Konferencja techniczna Zegrze 2010r.
23. *Pienkowski K.*: Wpływ stabilizacji statecznej stratyfikacji przepływu na wydajność użytkową ogrzewaczy wody, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1976r.
24. *Pluta Z., Wnuk R.*: Zbiorniki magazynujące ciepło w instalacjach pozyskujących energię promieniowania słonecznego – Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo , Wentylacja, nr 10, 1997r.
25. *Rosen M.A., Hooper F.C.*: Designer-Oriented Temperature-Distribution Models for Vertically Stratified Thermal Energy Storages to Facilitate Energy and Exergy Evaluation Proceedings of the 6th International Conference on Thermal Energy Storage – Calorstock '94, pp. 263-270. Espoo, Finland. 1994r.
26. *Schmidt T., Danda R.*: Budowa i eksploatacja zasobnika ciepła – Ciepłownictwo w Polsce i na świecie, Rocznik III(1996), zeszyt 11-12, 1996r.
27. *Stefanowski B.*: Gospodarka cieplna i jej kontrola w zakładach przemysłowych - Wydawnictwa Naukowe Komisji Wydawniczej T-wa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1925r.
28. *Szargut J., Ziębik A.*: Skojarzone wytwarzanie ciepła i elektryczności – elektrociepłownie, PAN Oddział 2w Katowicach, Gliwice 2007r.
29. *Szkarowski A., Łatowski L.*: Sieci i centrale ciepłownicze, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki koszalińskiej, Koszalin 2002
30. *Szymczak J.*: Prawo powinno sprzyjać modernizacji, Biznes i energia, Dziennik Gazeta Prawna 28 października 2010r. nr 211 – wywiad z Prezesem IGCP Jackiem Szymczakiem
31. *Ter-Gazarian A.*: Energy storage for power systems – Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, United Kingdom 1988r.
32. *Wirchowski R.*: „Kierunki rozwoju energetyki cieplnej, na podstawie doświadczeń duńskich”, Rynek Instalacyjny, kwiecień 2000r.

33. *Wojciechowski H., Musner H.*: Wodne waporowe zasobniki ciepła w systemie energetycznym. *Gospodarka Paliwami i Energią*, Nr 9, 1991r.
 34. *Wojciechowski H.*: Zasobniki ciepła w skojarzonych układach wytwarzana energii elektrycznej i ciepła, *Instal* 5/2007r.
 35. *Wojdyga K.*: Historia rozwoju systemów ciepłowniczych, wykład, Warszawa 2008r.
 36. *Wojdyga K.*: Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w miejskich systemach ciepłowniczych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2007r.
 37. *Zwierzchowski R., Dzierzgowski M.*: Zastosowanie centralnych zasobników ciepła w komunalnych systemach ciepłowniczych, IV Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje 18-20 Września 2000r.
 38. *Zwierzchowski R., Kwestarz M.*: Rola centralnych zasobników ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych, VIII Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje 2004r.
 39. *Zwierzchowski R.*: Zastosowanie akumulatorów ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych szansą na zwiększenie efektywności i pewności zasilania odbiorców w energię cieplną i elektryczną, XIV Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje 2010r.
-
40. *EUROHEAT & POWER* District hosting and cooling country by country/ 2009 survey
 41. *EUROHEAT & POWER* District hosting and cooling country by country/ 2011 survey
 42. *INSTAL Rzeszów*, ul. Mikołaja Reja 12, 35-211 Rzeszów: „Akumulator ciepła Ø 8000 x 14000”, Rzeszów, 2001r.
 43. *Polska Norma PN-91/B-02415* „Zabezpieczenie wodnych zamkniętych systemów ciepłowniczych, Wymagania, Ogrzewnictwo i ciepłownictwo”
 44. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki* z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych, Dz. U. Nr 16 poz. 92 z dnia 1 lutego 2007r.
 45. *Stockholm Energi*: Introducing the Stockholm Energi facility Vartaverket – materiały reklamowe, Stockholm 1992r.
 46. *Stołeczne Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej S.A., Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ciepłownictwa*: Wytyczne projektowania węzłów cieplnych, Część 2, Warszawa, luty 2010r.
 47. www.cieplosystemowe.pl
 48. www.energetyka.xtech.pl
 49. www.fortum.pl

Spis rysunków

Rysunek 2.1 System ciepłowniczy – schemat poglądowy	11
<i>Figure 2.1 Scheme of the heating system</i>	11
Rysunek 2.2 Udział poszczególnych paliw stosowanych w źródłach zasilających systemy ciepłownicze w krajach UE	13
<i>Figure 2.2 Parts of fuels supplied heat sources of heating systems in the EU countries</i>	13
Rysunek 2.3 Schemat kotła WR-25	14
<i>Figure 2.3 Scheme of the WR-25 boiler</i>	14
Rysunek 2.4 Schemat węzła dwufunkcyjnego w układzie szerego-równoległym	16
<i>Figure 2.4 Scheme of double functional heat exchange unit in seriate - parallel configuration</i>	16
Rysunek 3.1 Schemat zasobnika pary Ruths'a	25
<i>Figure 3.1 Scheme of the steam Ruths's storage</i>	25
Rysunek 3.2 Schemat zasobnika nieizotermicznego w systemie centralnego ogrzewania.....	26
<i>Figure 3.2 Scheme of non isothermal storage in the central heating system</i>	26
Rysunek 3.3 Zasobnik ciepła włączony w system ciepłowniczy bezpośrednio	27
<i>Figure 3.3 Heat storage directly turned on in the heating system</i>	27
Rysunek 3.4 Schemat elektrociepłowni w Hamburgu z włączonym zasobnikiem ciepła	27
<i>Figure 3.4 Scheme of CHP plant in Hamburg with a heat storage: SCW- water heating network, SCP- steam heating network</i>	27
Rysunek 3.5 Węzeł ciepłowniczy współpracujący z zasobnikiem ciepła zasilany z sieci ciepłowniczej Burgerspital Bazyleja Szwajcarii	28
<i>Figure 3.5 Heat exchangers substation co-operating with the thermal energy storage of the heating system in Burgerspital Basel Switzerland</i>	28
Rysunek 3.6 Schemat systemu ciepłowniczego z centralnym, beciśnieniowym zasobnikiem ciepła	30
<i>Figure 3.6 Scheme of the district heating system with central, pressureless thermal energy storage</i>	30
Rysunek 3.7 Schemat podłączenia pośredniego zasobnika do układu hydraulicznego źródła	31
<i>Figure 3.7 Scheme of indirectly connected thermal energy storage with a hydraulic structure of power plant</i>	31

Rysunek 3.8 Schemat podłączenia bezpośredniego zasobnika do układu hydraulicznego źródła.....	32
<i>Figure 3.8 Scheme of indirectly connection thermal energy storage into a hydraulic structure of power plant</i>	<i>32</i>
Rysunek 3.9 Schemat podłączenia zasobnika rozproszonego do sieci ciepłowniczej ...	33
<i>Figure 3.9 Scheme of connection distractive thermal energy storage into a heating network</i>	<i>33</i>
Rysunek 3.10 Widok elektrociepłowni Battersea i zasobnika ciepła w Pilico.....	34
<i>Figure 3.10 Prospect of Battersea`s CHP power plant and a thermal energy storage in Pimlico.....</i>	<i>34</i>
Rysunek 3.11 Schemat podłączenia zasobnika do sieci ciepłowniczej - elektrociepłownia Niehl	36
<i>Figure 3.11 Scheme of connection a thermal energy storage into hating network – CHP power plant in Niehl</i>	<i>36</i>
Rysunek 3.12 Zasobnik ciepła pracujący w systemie ciepłowniczym Sztokholmu.....	37
<i>Figure 3.12 Thermal energy storage co-operating with a district heating system in Stockholm</i>	<i>37</i>
Rysunek 3.13 Schemat centrali ciepłowniczej współpracującej z zasobnikiem ciepła .	39
<i>Figure 3.13 Scheme of heating central station co-operating with a thermal energy storage</i>	<i>39</i>
Rysunek 3.14 Dysza górna zasobnika ciepła w trakcie montażu w EC Siedlce	40
<i>Figure 3.14 Installation of top jets in the boiler of the CHP in Siedlce</i>	<i>40</i>
Rysunek 13.15 Zasobnik w Warszawie EC Siekierki	40
<i>Figure 13.15 Thermal energy storage in the CHP Siekierki in Warsaw.....</i>	<i>40</i>
Rysunek 3.16 Widok baterii zasobników ciepła obok budynku EC Fortum w Świebodzicach	41
<i>Figure 3.16 View of the thermal energy storages next to the CHP power plant Fortum in Świebodzice</i>	<i>41</i>
Rysunek 3.17 Schemat poglądowy podłączenia zasobnika ciepła do miejskiej sieci ciepłowniczej	41
<i>Figure 3.17 Scheme of connecting thermal energy storage with a district heating system</i>	<i>41</i>
Rysunek 3.18 Schemat konstrukcyjny zbiornika zasobnika ciepła w Siedlcach.....	45
<i>Figure 3.18 Construction drawing of the thermal heat storage in Siedlce</i>	<i>45</i>
Rysunek 3.19 Obraz synoptyczny zasobnika ciepła wraz z układem wymienników zasilająco-rozładowujących.....	45
<i>Figure 3.19 Synoptic screen of the thermal energy storage with load and unload heat exchanger units.....</i>	<i>45</i>

Rysunek 4.1 Obiegi wodne źródła ciepła z układem pomp stabilizująco-uzupełniających.....	47
<i>Figure 4.1 Water cycles in heat plant with stabilizing and additional water pumps in one set.....</i>	<i>47</i>
Rysunek 4.2 Obiegi wodne źródła ciepła z układem pomp stabilizujących i pomp uzupełniających.....	48
<i>Figure 4.2 Water cycles in heat plant with stabilizing pumps set and additional water pumps set.....</i>	<i>48</i>
Rysunek 4.3 Schemat podłączenie pomp zmieszania gorącego z dodatkowym obiegiem chłodzącym – schemat A i pomp przewałowych – schemat B.....	49
<i>Figure 4.3 Scheme of connecting the pumps of hot mixing with the additional circulation cooling – fig. A and boiler pumps– fig. B.....</i>	<i>49</i>
Rysunek 4.4 Schemat układu wody sieciowej ciepłowni.....	50
<i>Figure 4.4 Scheme of water cycle in power plant.....</i>	<i>50</i>
Rysunek 4.5 Schemat obiegu wodnego kotłowni – inny wariant eliminacji strat dławienia w obiegu zmieszania zimnego.....	50
<i>Figure 4.5 Scheme of water cycle in heat plant – another possibility of reduction stifle losses in cold mixing circulation.....</i>	<i>50</i>
Rysunek 4.6 Uproszczony schemat obiegu wodnego elektrociepłowni z zasobnikiem.....	52
<i>Figure 4.6 Simplified scheme of the water cycle in CHP plant with thermal energy storage.....</i>	<i>52</i>
Rysunek 4.7 Sposób włączenia zasobnika ciepła w układ hydrauliczny elektrociepłowni bezpośrednio bez pompowni zasobnika.....	52
<i>Figure 4.7 Method of storage installation a thermal energy storage into hydraulic cycle in CHP plant without storage pumps set.....</i>	<i>52</i>
Rysunek 4.8 Proces ładowania zasobnika.....	53
<i>Figure 4.8 Process of loading the thermal energy storage.....</i>	<i>53</i>
Rysunek 4.9 Proces rozładowywania zasobnika.....	55
<i>Figure 4.9 Process of unloading the thermal energy storage.....</i>	<i>55</i>
Rysunek 4.10 Wykresy regulacyjne wybranych systemów ciepłowniczych.....	58
<i>Figure 4.10 Regulation diagrams for chosen district heating systems.....</i>	<i>58</i>
Rysunek 4.11 Średnie, dobowe obciążenia cieplne systemu ciepłowniczego w latach 1999-2000.....	61
<i>Figure 4.11 Average, daily power capacity of district heating system in 1999-2000....</i>	<i>61</i>
Rysunek 4.12 Przebieg rzeczywistego i zmodyfikowanego obciążenia mocą systemu ciepłowniczego.....	62
<i>Figure 4.12 Course of practice and modify power capacity of district heating system .</i>	<i>62</i>

Rysunek 4.13 Teoretyczne i rzeczywiste wartości współczynnika K_h dla reprezentatywnych przebiegów obciążeń sytemu ciepłowniczego	64
<i>Figure 4.13 Theoretical and practice value of K_h factor for representative power capacity of district heating system course</i>	<i>64</i>
Rysunek 4.14 Wybrany przebieg obciążeń miejskiej sieci ciepłowniczej dla tygodnia 5-11.06.2000	65
<i>Figure 4.14 Selected operating load of the district heating system for week 5-11.06.2000</i>	<i>65</i>
Rysunek 4.15 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni roboczych, przy $K_h=1,2$	65
<i>Figure 4.15 Representative daily power capacity profile of district heating system for working days with factor $K_h=1,2$.....</i>	<i>65</i>
Rysunek 4.16 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni wolnych od pracy, przy $K_h=1,2$	66
<i>Figure 4.16 Representative daily power capacity profile of district heating system for weekend days with factor $K_h=1,2$.....</i>	<i>66</i>
Rysunek 4.17 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni roboczych, przy $K_h=1,8-2,0$	66
<i>Figure 4.17 Representative daily power capacity profile of district heating system for working days with factor $K_h=1,8-2,0$</i>	<i>66</i>
Rysunek 4.18 Reprezentatywne przebiegi obciążeń dobowych dla dni wolnych od pracy, przy $K_h=1,8-2,0$	67
<i>Figure 4.18 Representative daily power capacity profile of district heating system for weekend days with factor $K_h=1,8-2,0$.....</i>	<i>67</i>
Rysunek 4.19 Obraz synoptyczny komory ciepłowniczej M28	70
<i>Figure 4.19 Synoptic screen District heating cell M28</i>	<i>70</i>
Rysunek 5.1 Pojemność cieplna zasobnika na tle zmian bieżącego zapotrzebowania na moc w funkcji wartości K_h	74
<i>Figure 5.1 Thermal energy storage capacity compared to actual fluctuation of power demand in district heating system with factor K_h.....</i>	<i>74</i>
Rysunek 5.2 Zmiana bieżącego zapotrzebowania na moc u odbiorców na tle produkcji energii cieplnej w układzie skojarzonym	75
<i>Figure 5.2 Permutation actual heat power demand comparing to electricity production in CHP</i>	<i>75</i>
Rysunek 5.3 Zmiany bieżącego zapotrzebowania na moc na tle przebiegu obciążeń układu kogeneracyjnego współpracującego z zasobnikiem ciepła.....	76
<i>Figure 5.3 Permutation actual heat power demand comparing to CHP unit load co-operating with thermal energy storage</i>	<i>76</i>

Rysunek 5.4 Zużycie ciepła w systemie „Dobry Przykład” – symulacja programem EnergyPro	77
<i>Figure 5.4 Heat consumption in a district heating system „Good example” – simulation by EnergyPro</i>	<i>77</i>
Rysunek 5.5a Roczna produkcja ciepła - symulacja programem EnergyPro	78
<i>Figure 5.5a Yearly heat production – simulation by EnergyPro</i>	<i>78</i>
Rysunek 5.5b. Roczna produkcja energii elektrycznej- symulacja programem EnergyPro	78
<i>Figure 5.5b. Yearly electricity production – simulation by EnergyPro</i>	<i>78</i>
Rysunek 5.6 Harmonogram cykli ładowania i rozładowywania zasobnika ciepła.....	79
<i>Figure 5.6 Loading and unloading periods of the thermal energy storage.....</i>	<i>79</i>
Rysunek 6.1 Topologia sieci.....	84
<i>Figure 6.1 Network topology.....</i>	<i>84</i>
Rysunek 6.2 Schemat sieci ciepłowniczej typu drzewo	86
<i>Figure 6.2 Scheme of district heating network of the type tree</i>	<i>86</i>
Rysunek 6.3 Graf sieci ciepłowniczej pokazanej na rysunku 6.2.....	87
<i>Figure 6.3 Graph of the district heating network showed on fig. 6.2.....</i>	<i>87</i>
Rysunek 6.4 Łuk sieci ciepłowniczej	103
<i>Figure 6.4 Curve of the the district heating network.....</i>	<i>103</i>
Rysunek 6.5 Mieszanie się strumieni	104
<i>Figure 6.5 Streams mixing.....</i>	<i>104</i>
Rysunek 7.1 Wartość sprzedaży ciepła w roku 2010 i współczynniki wykorzystania mocy	111
<i>Figure 7.1 Heat sale in 2010 with power utilization factors</i>	<i>111</i>
Rysunek 7.2 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej.....	114
<i>Figure 7.2 Graph of the district heating network.....</i>	<i>114</i>
Rysunek 7.3 Wyniki symulacji: wartości strumienia wody	114
<i>Figure 7.3 Simulation results: water streams value</i>	<i>114</i>
Rysunek 7.4 Wyniki symulacji wartości mocy źródła	114
<i>Figure 7.4 Simulation results: capacity of power plant value.....</i>	<i>114</i>
Rysunek 7.5 Wyniki symulacji wartości temperatury powrotu.....	115
<i>Figure 7.5 Simulation results: water return temperature value.....</i>	<i>115</i>
Rysunek 7.6 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej.....	115
<i>Figure 7.6 Graph of the district heating network.....</i>	<i>115</i>

Rysunek 7.7 Temperatura wody ciepłowniczej w wybranych węzłach sieci – wyniki symulacji – scenariusz ZIMA	119
<i>Figure 7.7 Water temperatures in selected heat exchangers stations – simulation results – winter scenario</i>	119
Rysunek 7.8 Moc źródła i strata w systemie ciepłowniczym w procesie dystrybucji – wyniki symulacji – scenariusz ZIMA	120
<i>Figure 7.8 Power plant capacity and factors of heat power losses during heat transportation process by district heating network – simulation results – winter scenario</i>	120
Rysunek 7.9 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji styczeń 2010r	121
<i>Figure 7.9 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – January 2010</i>	121
Rysunek 7.10 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji marzec 2010r	121
<i>Figure 7.10 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – March 2010</i>	121
Rysunek 7.11 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów – wyniki symulacji listopad 2010r	122
<i>Figure 7.11 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – November 2010</i>	122
Rysunek 7.12 Temperatura wody ciepłowniczej w wybranych węzłach sieci – wyniki symulacji – scenariusz LATO	123
<i>Figure 7.12 Water temperatures in selected heat exchangers substations – simulation results – summer scenario</i>	123
Rysunek 7.13 Moc źródła i strata w systemie ciepłowniczym w procesie dystrybucji – wyniki symulacji – scenariusz LATO	124
<i>Figure 7.13 Power plant capacity and factors of heat power losses during heat transportation process by district heating network – simulation results – summer scenario</i>	124
Rysunek 7.14 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji dla 80% wykorzystania mocy wymienników CWU	125
<i>Figure 7.14 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – for power tap water utilization factor 80%</i>	125
Rysunek 7.15 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji dla 20% wykorzystania mocy wymienników CWU	125
<i>Figure 7.15 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – for power tap water utilization factor 20%</i>	125
Rysunek 7.16 Opóźnienie transportowe dla wybranych węzłów sieci – wyniki symulacji lipiec 2010r	126
<i>Figure 7.16 Transporting delay for selected heat exchangers substations – simulation results – July 2010</i>	126

Rysunek 7.17 Graf miejskiej sieci ciepłowniczej z zaznaczonymi węzłami zainstalowania zasobników ciepła i obszarami zasilania w ciepło przez zasobniki.....	127
<i>Figure 7.17 Graph of district heating network with installing thermal energy storages and area of supply energy by thermal energy storages.....</i>	<i>127</i>
Rysunek 7.18 Czasy opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północno-wschodniego – scenariusz zima.....	129
<i>Figure 7.18 Transporting delay for heat exchange substation in north-east area – winter scenario.....</i>	<i>129</i>
Rysunek 7.19 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północnego – scenariusz zima.....	130
<i>Figure 7.19 Transporting delay for heat exchange substation in north area – winter scenario.....</i>	<i>130</i>
Rysunek 7.20 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru zachodniego – scenariusz zima.....	130
<i>Figure 7.20 Transporting delay for heat exchange substation in west area – winter scenario.....</i>	<i>130</i>
Rysunek 7.21 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północno-wschodniego – scenariusz lato.....	131
<i>Figure 7.21 Transporting delay for heat exchange substation in north-east area – summer scenario.....</i>	<i>131</i>
Rysunek 7.22 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru północnego – scenariusz lato.....	132
<i>Figure 7.22 Transporting delay for heat exchange substation in north area – summer scenario.....</i>	<i>132</i>
Rysunek 7.23 Czas opóźnienia transportowego dla węzła ciepłowniczego położonego na peryferiach obszaru zachodniego – scenariusz lato.....	133
<i>Figure 7.23 Transporting delay for heat exchange substation in west area – summer scenario.....</i>	<i>133</i>
Rysunek 7.24 Moc źródła ciepła i udział strat w procesie dystrybucji ciepła – scenariusz zima.....	134
<i>Figure 7.24 Power of the heating plant and losses during distribution of heat – winter scenario.....</i>	<i>134</i>
Rysunek 7.25 Moc źródła ciepła i udział strat w procesie dystrybucji ciepła – scenariusz lato.....	135
<i>Figure 7.25 Power of the heating plant and losses during distribution of heat – summer scenario.....</i>	<i>135</i>

Spis tabel

Tabela 2.1 Dane eksploatowanych systemów ciepłowniczych w wybranych krajach Unii Europejskiej, Rosji, Chinach, Korei i Japonii	21
<i>Table 2.1 Data of heating systems in certain countries of European Union, Russia, China, Korea and Japan</i>	<i>21</i>
Tabela 3.1 Zestawienie czynników akumulujących energię ciepłą.....	24
<i>Table 3.1 List of materials accumulating thermal energy.....</i>	<i>24</i>
Tabela 4.1 Tabele regulacyjne wybranych systemów ciepłowniczych	57
<i>Table 4.1 Regulating tables tables of chosen heating systems</i>	<i>57</i>
Tabela 4.2 Uśrednione dane z tygodni maja i czerwca.....	60
<i>Table 4.2 Average data for weeks of May and June.....</i>	<i>60</i>
Tabela 4.3 Uśrednione dane z tygodni lipca i sierpnia	60
<i>Table 4.3 Average data for weeks of July and August.....</i>	<i>60</i>
Tabela 4.4 Uśrednione dane z tygodni września i października.....	60
<i>Table 4.4 Average data for weeks of September and October.....</i>	<i>60</i>
Tabela 4.5 Uśrednione dane z tygodni maja i czerwca dla $K_h=1,8-2,0$	62
<i>Table 4.5 Average data for weeks of May and June with $K_h=1,8-2,0$</i>	<i>62</i>
Tabela 4.6 Uśrednione dane z tygodni lipca i sierpnia dla $K_h=1,8-2,0$	63
<i>Table 4.6 Average data for weeks of July and August with $K_h=1,8-2,0$.....</i>	<i>63</i>
Tabela 4.7 Uśrednione dane z tygodni września i października dla $K_h=1,8-2,0$	63
<i>Table 4.7 Average data for weeks of September and October with $K_h=1,8-2,0$.....</i>	<i>63</i>
Tabela 5.1 Charakterystyki techniczne elektrociepłowni duńskich.....	77
<i>Table 5.1 Technical characteristics/specifications of Danish CHP power plants</i>	<i>77</i>
Tabela 7.1 Wyniki symulacji i dane pomiarowe dla węzłów ciepłowniczych.....	115
<i>Table 7.1 Simulation results and measurements data for heat exchangers stations</i>	<i>115</i>
Tabela 7.2 Moc wymienników zainstalowanych w węzłach ciepłowniczych z podziałem na obszary	127
<i>Table 7.2 Installed heat exchange capacity in substations in areas.....</i>	<i>127</i>
Tabela 7.3. Moce zasobników ciepła osiągane w poszczególnych wariantach pracy ..	128
<i>Table 7.3 Power of thermal energy storages for different variants.....</i>	<i>128</i>





BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej

C. 144064



400000000186939