



POLITECHNIKA OPOLSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY

# Wpływ parametrów eksploatacyjnych na efektywność sieci grzewczej osiedla Scharnhauser Park.

---

**Mgr inż. Aneta Strzałka**

Promotorzy: prof. dr hab. inż. Roman Ulbrich  
prof. dr. hab. Ursula Eicker

Opole 2013

Praca niniejsza powstała w ramach projektu EU POLYCITY, dzięki inspiracji pani prof. dr. hab. Ursuli Eicker.

Dziękuję pracownikom Wydziału Fizyki Budowli oraz Wydziału Geoinformacji na uczelni technicznej w Stuttgarcie za udostępnienie danych oraz dzielenie się wiedzą i doświadczeniami.

Aneta Strzałka

Pracę niniejszą dedykuję  
mojemu mężowi Rafałowi  
oraz synowi Olivierowi,  
dziękując im za wsparcie...

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Przegląd metod prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą.....</b>	<b>18</b>
2.1	Opis istniejących metod .....	18
<b>3</b>	<b>Cel i teza pracy .....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>Osiedle mieszkalne Scharnhauser Park .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Opis modeli prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą .....</b>	<b>32</b>
5.1	Ogólny opis modelowania zapotrzebowania na ciepło grzewcze .....	32
5.2	Opis modeli matematycznych do prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą.....	33
5.2.1	Model 1 – przenikanie ciepła przez przegrody zewnętrzne .....	35
5.2.2	Model 2 –całkowity bilans energetyczny badanego obiektu.....	36
5.2.3	Model 3 –model dynamiczny .....	38
5.3	Implementacja modeli w środowisku symulacyjnym INSEL .....	51
5.3.1	Model 1 .....	51
5.3.2	Model 2 .....	53
5.3.3	Model 3 .....	57
5.3.4	Blok obliczeniowy dla parametrów użytkowych .....	60
5.4	Dane wejściowe do modeli symulacyjnych .....	61
5.4.1	Dane geometryczne .....	61
5.4.2	Dane do obliczeń cieplnych .....	63
5.5	Weryfikacja modeli symulacyjnych obliczających zapotrzebowanie na ciepło grzewcze ....	64
5.5.1	Pomieszczenie testowe.....	65
5.5.2	Obiekt realny osiedla SHP – „obiekt testowy” .....	67

<b>6</b>	<b>Wyniki pomiarowe i obliczeniowe zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej osiedla SHP.....</b>	<b>73</b>
6.1	Pomieszczenie testowe.....	73
6.1.1	Analiza danych pomiarowych.....	73
6.1.2	Weryfikacja modeli symulacyjnych.....	76
6.2	Obiekt testowy.....	78
6.2.1	Weryfikacja w skali jednej godziny.....	83
6.2.2	Weryfikacja w skali jednego dnia.....	86
6.2.3	Weryfikacja w skali miesięcznej.....	88
6.2.4	Weryfikacja w skali sezonu grzewczego.....	90
6.3	Cała sieć grzewcza osiedla SHP.....	91
6.3.1	Analiza danych z monitoringu osiedla SHP.....	91
6.3.2	Weryfikacja modeli symulacyjnych.....	93
6.4	Wpływ stopnia szczegółowości danych na wyniki obliczeń zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą.....	98
<b>7</b>	<b>Dyskusja wpływu parametrów użytkowych na eksploatację sieci grzewczej osiedla SHP. ....</b>	<b>100</b>
7.1	Dyskusja wpływu parametrów użytkowych na zapotrzebowanie na energię ciepłą obiektu testowego.....	100
7.1.1	Temperatura wewnętrzna.....	100
7.1.2	Krotność wymiany powietrza.....	103
7.1.3	Zyski wewnętrzne.....	104
7.1.3.1	Wewnętrzne zyski ciepła od urządzeń elektrycznych.....	104
7.1.3.2	Wewnętrzne zyski ciepła od osób.....	105
7.2	Wizualizacja wyników przy użyciu systemu geoinformacyjnego.....	108
<b>8</b>	<b>Podsumowanie i wnioski końcowe.....</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>Spis literatury.....</b>	<b>111</b>

<b>10</b>	<b>Załącznik – tok obliczeniowy modelu matematycznego (model 2)</b> .....	<b>118</b>
10.1	Obliczenia wstępne .....	118
10.2	Obliczenia współczynników strat mocy cieplnej .....	118
10.3	Obliczenie redukcji nocnej w ogrzewaniu .....	120
10.4	Obliczenie strat/zysków ciepła przez przenikanie.....	121
10.5	Straty/zyski ciepła .....	123
10.6	Bilans miesięczny.....	124

# 1 Wprowadzenie

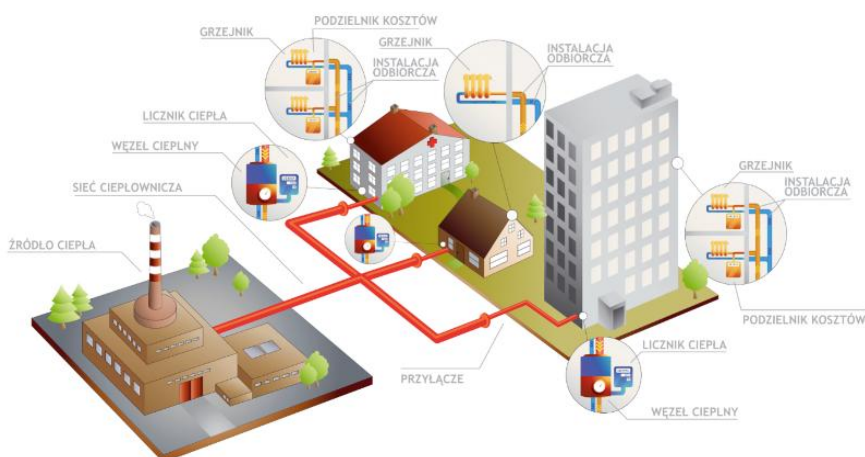
Ostatnie stulecie to okres szybkiego rozwoju przemysłowego na całym świecie, któremu towarzyszy niezwykle dynamiczny wzrost liczby ludności, jak i postęp naukowo-techniczny. Europa należy do najbardziej zurbanizowanych kontynentów na świecie, gdzie około 75% populacji zamieszkuje obszary miejskie. Szybki rozwój technologiczny prowadzi do coraz to większego zużycia energii, a co za tym idzie do szybkiego wyczerpywania się łatwo dostępnych i stosunkowo tanich zasobów paliw kopalnych. Obszary miejskie są szczególnie odpowiedzialne za pogorszenie się stanu środowiska naturalnego. W związku z tym Unia Europejska (UE), począwszy od lat 90-tych ubiegłego wieku, prowadzi zdecydowane działania mające na celu rozwiązanie problemów degradacji środowiska naturalnego i pokrycia potrzeb energetycznych. Jednym z nich był protokół z Kioto, opracowany w 1995 roku, po nim z kolei Unia Europejska podjęła różne działania mające na celu rozwiązanie problemów klimatycznych, poprawę efektywności energetycznej i szersze wykorzystanie alternatywnych źródeł energii (AZE), szczególnie w odniesieniu do obszarów zurbanizowanych.

Intensyfikacja prac nad zwiększeniem efektywności wykorzystania energii nastąpiła w latach 70-tych wraz z nastaniem pierwszego kryzysu paliwowego, Weizsäcker i inni [107]. Kryzys paliwowy przyczynił się także do uwidocznienia zależności państw Europy od dostaw energii. Od tego czasu, ważnym przedmiotem badań naukowych w krajach Europy Zachodniej stało się poszukiwanie nowych technologii umożliwiających osiągnięcie wysokiej efektywności wykorzystania energii. Głównym aspektem prowadzonych prac jest przede wszystkim ograniczenie zużycia energii, a co za tym idzie negatywnych skutków jakie wywiera jej wytwarzanie na środowisko naturalne. Jedną z ostatnich inicjatyw mających umożliwić realizację celów polityki energetycznej EU jest pakiet energetyczno-klimatyczny 3 x 20%, przyjęty podczas szczytu przywódców państw członkowskich w czerwcu 2009. Pakiet ten zawiera trzy główne postulaty poprawy efektywności sektora energetycznego, do których należą: redukcja emisji gazów cieplarnianych w krajach europejskich o co najmniej 20% w odniesieniu do poziomu z roku 1990, 20% udział AZE w produkcji energii i 20% redukcja pierwotnego zużycia energii poprzez poprawę efektywności energetycznej, Eicker i inni [23]. W rzeczywistości jednak, biorąc pod uwagę obecną sytuację w sektorze energetycznym, jako realistyczną prognozę należałoby przyjąć osiągnięcie jedynie połowy docelowych 20%, Szymczak [99]. Z tego względu, Komisja Europejska podjęła decyzje o wprowadzeniu dyrektywy odnośnie efektywności energetycznej. Dyrektywa ta ma na celu zwiększenie oszczędności energii zarówno po stronie odbiorców energii, jak i dystrybutorów energii. Szczególnie istotnym aspektem tych działań jest poprawa przepływu informacji odnośnie zużycia energii poszczególnych odbiorców [13]. Działania prowadzone na rzecz racjonalizacji zużycia energii niosą ze sobą nowe, trudne wyzwania dla branży ciepłowniczej; m.in. promowane będzie wytwarzanie ciepła przy pomocy kogeneracyjnych technologii. Pokrywanie zapotrzebowania na ciepło przy wykorzystaniu sieci grzewczych ma również szczególne znaczenie w przypadku poprawy efektywności energetycznej.

Państwa europejskie coraz to powszechniej wprowadzają działania w kierunku poprawy wykorzystania energii. Jednym z nich oprócz poprawy efektywności ciepłownictwa systemowego, jest wdrażanie AZE energii do produkcji energii na większą skalę, jak np. dla osiedli, miast. Rozwój technologii bazujących na wykorzystaniu AZE charakteryzuje się dużą dynamiką, a ich udział w końcowym zużyciu energii ciągle wzrasta. Jeśli chodzi o sytuację w Polsce, to informacje zebrane w pracy [103] wskazują, że następuje stopniowy rozwój energetyki odnawialnej. Z uwagi na fakt, iż jej udział w bilansie energetycznym jest nadal stosunkowo niewielki, konieczne jest zwiększenie dynamiki rozwoju sektora energetyki odnawialnej. Realizacje tych celów mają wesprzeć akty prawne, jak np. Renewable Energy Sources Law [75], czy też akt prawny EnEV 2009 [25], jak i inne wprowadzane w życie na terenie Europy, których celem jest redukcja zapotrzebowania na energię oraz zwiększenie udziału energii odnawialnych do jej produkcji.

W krajach europejskich budynki mieszkalne i użyteczności publicznej są konsumentem ponad 40% energii pierwotnej [72]. Także w przypadku ciepła systemowego, z uwagi na strukturę jego zużycia, rynkiem zbytu jest głównie mieszkalnictwo wielorodzinne. Ciepło systemowe charakteryzuje się atrakcyjnością dla inwestora pod względem kosztów przyłączenia, a i późniejszej ceny eksploatacji dla konsumenta. Dlatego, większość nowo wybudowanych osiedli mieszkaniowych, będących częścią aglomeracji miejskich, posiada właśnie taki rodzaj ogrzewania. Blisko 52% zapotrzebowania na ciepło pokrywa w Polsce ciepło systemowe, którego największymi odbiorcami są spółdzielnie i wspólnoty mieszkaniowe (łącznie ponad 60%), Szymczak [99]. To właśnie sieci ciepłownicze stanowią najważniejszą część systemów ciepłowniczych, z uwagi na ich wpływ na koszty ciepła po stronie odbiorczej, na straty przesyłania ciepła, a i niezawodność jego dostawy do odbiorców, Kręcielewska i inni [51].

System ciepłowniczy, czy też inaczej sieć grzewcza jest to system przewodów przebiegających na zewnątrz budynków ogrzewanych, służący do przesyłania ciepła ze źródła do węzłów. Źródłem ciepła dla systemu ciepłowniczego może być ciepłownia, pracująca na potrzeby większej ilości budynków lub elektrociepłownia, tzw. komunalno-bytowa. Węzły ciepła to z kolei zespół urządzeń do przekazywania ciepła, przetwarzania parametrów, pomiaru i regulacji. Rys. 1-1 przedstawia schemat sieci ciepłowniczej.



Rys. 1-1: Schemat sieci grzewczej [111].

W sieci grzewczej, energia transportowana jest przy pomocy nośników energii, takich jak gorąca woda lub para wodna. W przypadku komunalnych sieci grzewczych, najczęściej wykorzystywanym nośnikiem jest woda; w sieciach niskotemperaturowych temperatura wody nie przekracza  $115^{\circ}\text{C}$ . Sieci tego typu stosowane są np. w lokalnych (osiedlowych) systemach ciepłowniczych. W wysokotemperaturowych wodnych sieciach komunalnych, temperatury czynnika ciepłowniczego nie przekraczają zwykle  $135^{\circ}\text{C}$ . Temperatury te zależą głównie od strefy klimatycznej i pory roku. Sieci grzewcze, które wykorzystują jako nośnik wodę, wprowadzone zostały przez Birdsill Holly, a ich pierwsze zastosowanie miało miejsce w Nowym Jorku w 1877 roku. W czasach obecnych stosuje się sieci grzewcze w miastach i obszarach miejskich o wzrastającym zapotrzebowaniu na energię ciepłą. Według Pfeifer i inni [65], wielkość potencjału oszczędnościowego sieci grzewczej zależy w głównej mierze od aktualnego i przyszłego zużycia energii cieplnej poszczególnych jej odbiorców. Dlatego, określenie tego potencjału stanowi najważniejszy aspekt projektowania nowych systemów ciepłowniczych.

Ciepłownia, jako jeden z elementów systemu ciepłowniczego, w zależności od planowanego zapotrzebowania na energię ciepłą, wytwarza energię o określonej mocy, tzw. mocy osiągalnej. Z kolei cała moc, która jest doprowadzana z ciepłowni do sieci określana jest mianem mocy wytwarzanej netto. Moc szczytowa dotyczy przebiegu dobowego zapotrzebowania/zużycia energii cieplnej i jest to największa moc pobierana w szczycie obciążenia dobowego w rozważanym okresie. Parametry sieci wskazują, jak bardzo ważne jest, aby dostarczyć informacji o zużyciu energii cieplnej, a dokładniej, dobowym profilu jej zużycia przez odbiorcę w celu optymalizacji pracy całego systemu ciepłowniczego. Śnieżyk [86] zauważa, iż istotnym problemem ciepłownictwa jest właściwe rozliczanie opłat za dostarczone ciepło, gdzie przyczyną nieporozumień między dostawcami a odbiorcami ciepła jest wartość mocy zamówionej. W tym celu, prace badawcze w krajach Europy Zachodniej dążą do stworzenia tak zwanych inteligentnych sieci (ISE). Dzięki inteligentnym sieciom, możliwy jest dwustronny przepływ informacji oraz przyczyniają się one do automatyzacji sieci przesyłowej i dystrybucyjnej, Kamiński [36]. Sieci takie (ang. smart grid), mają wpłynąć na usprawnienie eksploatacji systemu ciepłowniczego, ograniczyć energochłonność, zmniejszyć ubytki wody sieciowej w procesie przesyłu ciepła do odbiorców oraz umożliwić odbiorcom bieżącą kontrolę zużycia energii cieplnej i wpływanie na oszczędne wykorzystanie ciepła [12]. Zastosowanie takich systemów pozwala na łączenie, wzajemną komunikację oraz optymalne sterowanie rozproszonymi dotychczas elementami sieci energetycznych po stronie producentów, jak i odbiorców energii, Janowicz [45]. Pozwalają one zatem, poprzez połączenie dostawców energii, w tym także małych dostawców energii ze źródeł odnawialnych i użytkowników w jeden inteligentny system, w sposób dynamiczny zarządzać systemem ciepłowniczym. Dodatkowe wyposażenie ISE w nowoczesną infrastrukturę w postaci liczników, wyłączników, przełączników i rejestratorów umożliwia wzajemną wymianę informacji, co pozwala w efekcie końcowym na optymalizację zużycia energii cieplnej.

W celu oceny zużycia energii przez poszczególnych odbiorców sieci grzewczej, wykorzystuje się informacje uzyskane z pomiarów zużycia energii, tzw. monitoringu



energetycznego. Monitoring energetyczny polega na pomiarze i rejestracji wielkości, wykonywanych przy użyciu specjalistycznej aparatury, pozwalających określić ilość energii cieplnej dostarczanych do odbiorcy w określonych przedziałach czasowych, Kasperkiewicz [48]. Aby określić rzeczywiste zapotrzebowanie na ciepło grzewcze, stosuje się tzw. monitoring podstawowy, który polega na pomiarze ilości ciepła dostarczonego do odbiorcy sieci grzewczej w zależności od temperatury zewnętrznej. W celu oceny potencjału oszczędności energetycznej, konieczne jest jednak przeprowadzenie szczegółowego monitoringu energetycznego, przy użyciu systemów automatycznego monitorowania energii, za pomocą tzw. inteligentnych liczników (ang. smart metering). Taki rodzaj monitoringu jest w stanie określić zmienne w czasie zużycie, a co za tym idzie zapotrzebowanie na energię ciepłą. Rosnące koszty energii i zwiększające się zapotrzebowanie na energię to kolejne czynniki, które wpływają na rozwój rynku takich liczników. Pod pojęciem smart metering rozumie się inteligentne liczniki energii, które w sposób automatyczny monitorują zużycie energii, następnie zmierzone wartości analizują i przekazują użytkownikowi lub też dostawcom energii. Kolejną zaletą takich liczników jest możliwość rejestrowania nie tylko samego zużycia energii cieplnej, ale również całej jego charakterystyki w ciągu doby. Proekologiczna polityka UE i unijne prawodawstwo wymuszają na krajach członkowskich wprowadzenie rozwiązań, które poprawią efektywność energetyczną [36]. Inteligentne liczniki należą do rozwiązań powszechnie stosowanych w krajach Europy Zachodniej i powoli wchodzi na rynek krajów Europy Środkowej i Wschodniej. Instalacja inteligentnych liczników jest krokiem do wprowadzenia wyżej wspomnianych inteligentnych sieci, które integrują odbiorcę z wytwórcą energii [36]. Inteligentne liczniki nie tylko pozwalają na dynamiczne zarządzanie zużyciem energii przez odbiorców końcowych, ale również pozwalają na szybką lokalizację nielegalnych poborów, uszkodzeń linii przesyłowej, a także innych awarii związanych z dystrybucją energii. Dlatego inteligentne liczniki stanowią interesujący temat nie tylko dla badaczy, ale również dla dostawców energii do np. sieci grzewczych obszarów miejskich. Zgromadzenie Bitkom [5] wskazało, że poprzez kombinację inteligentnych liczników z informacjami dostarczonymi użytkownikom, możliwe było znaczne ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Dzięki pomiarowi i wskazaniu aktualnych wartości zużycia energii elektrycznej możliwe było zidentyfikowanie urządzeń, które zużywają najwięcej energii, a co za tym idzie znalezienie możliwości ich wymiany na bardziej energooszczędne lub też wskazanie możliwości oszczędniejszego korzystania z nich. Analizy przeprowadzone przez Zgromadzenie Bitkom wykazały, że kombinacja inteligentnych liczników z informacjami dostarczonymi użytkownikom pozwoliła na 5%-ową redukcję zużycia energii elektrycznej w mieszkaniach testowych.

Dotychczas, technologia inteligentnych liczników znajduje zastosowanie głównie w sektorze elektroenergetycznym. Do tej pory zrealizowano jedynie bardzo nieliczne prace badawcze dotyczące sektora energii cieplnej, co spowodowane jest przede wszystkim, małą ilością inteligentnych liczników w tym sektorze. Kolejną przyczyną tego faktu, jest brak odpowiednich systemów do przetwarzania zmierzonych wartości zużycia energii cieplnej, tak aby można było poddać je porównaniu z wartościami obliczeniowymi zapotrzebowania na energię ciepłą i w ten sposób przekazać użytkownikom informacje dotyczące zmiany ich zachowań. W większości przypadków, szczególnie jeśli chodzi o monitoring zużycia energii

cieplnej, mamy do czynienia tylko z manualnym odczytem liczników energii. Taki sposób monitoringu stanowi pomocną alternatywę wówczas, gdy nowoczesny automatyczny monitoring nie istnieje [12], ale w celu wyznaczenia potencjału oszczędności energii konieczne będzie wprowadzenie takiego rodzaju monitoringu. Umożliwi on wskazywanie potencjałów oszczędności energii cieplnej, które będą wynikały z porównania aktualnego stanu zużycia energii cieplnej z wartościami obliczeniowymi przeprowadzonymi w sposób dynamiczny. Takie rozwiązanie może przyczynić się do znacznej poprawy efektywności energetycznej wykorzystania energii cieplnej przez odbiorców sieci. Poprzez możliwość analizy struktury zapotrzebowania na energię ciepłą, inteligentne liczniki, czy też inteligentne sieci grzewcze, mogą wpływać zarówno na popyt, jak i na podaż tej energii (symbioza dostawców, odbiorców i prosumentów ciepła). Jeśli chodzi o przebieg zużycia energii cieplnej, a i ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) w ciągu doby, to zazwyczaj jest on zależny od pory dnia. Wzrost zużycia energii cieplnej i c.w.u. zauważalny jest w godzinach porannych i wieczornych, a w porze nocnej i w godzinach pracy następuje zazwyczaj jego spadek. Najkorzystniejsze byłoby, gdyby użytkownicy energii korzystali z niej równomiernie w ciągu całej doby. Pozwoliłoby to na redukcję amplitudy zapotrzebowania szczytowego i umożliwiło racjonalne rozłożenie w czasie planowanego poboru. Szacuje się, że zastosowanie ISE, pozwoliłoby na oszczędność energii rzędu 10%, Janowicz [45]. Tutaj ważnym aspektem będzie przede wszystkim zmotywowanie odbiorców sieci grzewczych do zmiany swych nawyków w celu dopasowania zużycia energii do krzywej zapotrzebowania. Taki rodzaj eksploatacji sieci ciepłowniczej, gdzie następuje ciągle dopasowywanie strony podażowej do popytowej nazywa się metodą DSM (ang. Demand Side Management).

Jednym z przykładów scentralizowanych systemów ciepłowniczych w Polsce jest Warszawski System Ciepłowniczy (WSC), który dostarcza ok. 10000 GWh ciepła do swoich odbiorców na terenie Warszawy, gdzie straty w sieci i węzłach ciepłych stanowią nieco ponad 10% [12]. Jeżeli chodzi o wdrażanie inteligentnych sieci w Polsce, to pierwszym przedsiębiorstwem ciepłowniczym, które zdecydowało się na ten krok jest Stołeczne Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej S.A. Projekt ten obejmuje również WSC i zakłada wyposażenie go w urządzenia pomiarowe, aplikację systemu geoinformacyjnego (GIS) w celu optymalnego sterowania i eksploatacji tej sieci. Jeśli chodzi o zarządzanie siecią ciepłowniczą, to w ostatnich latach coraz częściej stosuje się systemy informacji geograficznej jako najnowocześniejszych narzędzi do tego celu, Fedorowicz i inni [28]. Taki system wspomaga realizację takich działań jak np. eksploatacja sieci, modernizacja i remont sieci ciepłowniczej, obsługa aktualnych i przyszłych odbiorców.

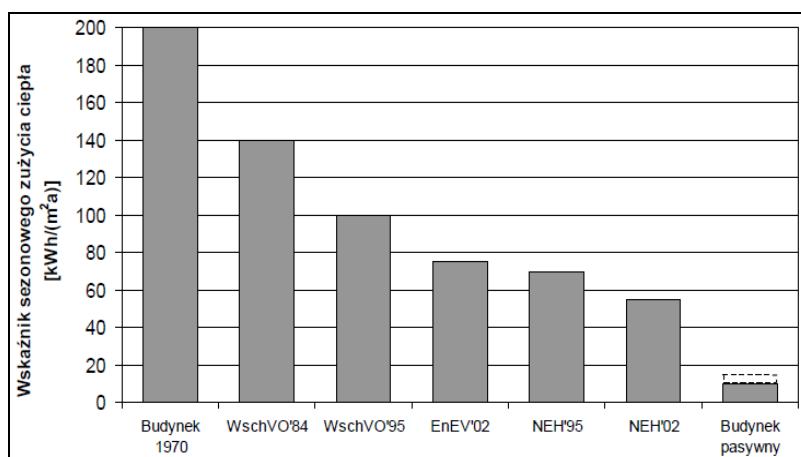
Ważnym aspektem według Ziębika i Szarguta [110], jest rozwój skojarzonej gospodarki ciepłno-elektrycznej, tzw. kogeneracji oraz prawidłowej regulacji w sieciach grzewczych i w mieszkaniach. Kogeneracja umożliwia wysoką efektywność wykorzystania energii pierwotnej paliwa, w ramach której produkowana jest energia elektryczna oraz ciepło. Taki system osiąga jednak opłacalność dopiero wtedy, gdy może on być eksploatowany przez okres całego roku. Dlatego coraz to bardziej istotne jest również wykorzystanie nadatków ciepła latem, które powstają przy produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowniach do produkcji chłodu sieciowego. Tu również istotnym aspektem jest fakt, iż elektrociepłownia musi pracować

poza sezonem grzewczym w celu zapewnienia dostaw c.w.u. do systemu, Goździkowski i inni [38]. Dla uzyskania wysokosprawnej kogeneracji konieczne jest pełne zagospodarowanie wyprodukowanej energii. O ile jest to dosyć łatwe w przypadku energii elektrycznej, to zagospodarowanie energii cieplnej zależne jest od korelacji pomiędzy parametrami wytwarzanego ciepła a możliwościami i potrzebami odbiorczymi, takimi jak:

- możliwy do odebrania strumień ciepła i zmienne potrzeby odbiorcze w czasie (sezon grzewczy, okres letni, rozkład dobowy obciążenia dla dni roboczych i wolnych) z uwzględnieniem infrastruktury dystrybucyjnej ciepła,
- parametry jakościowe: temperatura, ciśnienie,
- parametry ilościowe: strumień przepływu, Goździkowski i inni [38].

Ważnym czynnikiem doboru układu kogeneracji jest rodzaj wykorzystywanego paliwa. W ostatniej dekadzie nastąpił wzrost projektów wykorzystujących AZE w celu pokrycia zapotrzebowania na energię. Z uwagi na to, że udział energii odnawialnych na potrzeby zaopatrzenia w energię ciepłą będzie stale rósł, należy go również brać pod uwagę w analizach. Wg [35], wzrastający udział energii odnawialnych przyczynia się do opracowania technologii pozwalających na zintegrowanie energii pochodzącej z energii odnawialnych w ramach sieci zasilających obszary miejskie. Coraz to powszechniejsze staje się więc budowanie lokalnych zcentralizowanych źródeł energii opartych na AZE, których zaletą są niskie koszty przesyłu i dystrybucji energii.

Jeśli chodzi o zużycie energii cieplnej w sektorze komunalnym, które stanowi największy udział w światowym zużyciu energii cieplnej, to poziom zużycia energii cieplnej poszczególnych obiektów tego sektora, określony jest poprzez wielkość strat drogą przenikania przez ściany, okna i dach oraz straty przez nieszczelności, przy uwzględnieniu zysków ciepła z promieniowania słonecznego dzięki przegrodom przezroczystym i zysków eksploatacyjnych, Norwicz [63]. Przy określaniu całkowitego zużycia energii należy uwzględnić również energię wykorzystywaną w mieszkaniach, której wielkość zależy bezpośrednio od zachowań mieszkańców, Norwicz [63]. W Polsce przyjęto umownie wartość wskaźnika energochłonności na poziomie 90 kWh/m<sup>2</sup>a, która jest wartością graniczną, poniżej której można mówić o budynku energooszczędnym, Szczechowiak [97].



**Rys. 1-2: Rozwój standardów energooszczędności budynków mieszkalnych jednorodzinnych, Szczechowiak [97].**

W oparciu o dane przedstawione na Rys. 1-2 zauważyć można, iż w krajach Europy Zachodniej od 1995 roku obowiązywały przepisy, które ustalają energochłonność budynku na poziomie 70-100 kWh/m<sup>2</sup>a, w zależności od stosunku powierzchni przegród zewnętrznych do jego kubatury ogrzewanej (od 0,5 do 1,05 1/m, a nawet wyżej). W roku 2007 wprowadzono nowe przepisy, w których poziom ten obniżony został do 50-80 kWh/m<sup>2</sup>a. W Polsce efektywność energetyczna ogrzewania budynków podlega stałemu rozwojowi w kierunku jej poprawy. Obecnie zużycie energii cieplnej w mieszkalnictwie jest jeszcze stosunkowo wysokie, co spowodowane jest:

- jakością budynków,
- niską sprawnością energetyczną źródeł ciepła,
- dużymi stratami energii przesyłowymi (niewystarczającą izolacją),
- brakiem automatycznej regulacji dostaw ciepła w znacznej liczbie instalacji grzewczych budynków wielorodzinnych,
- brakiem motywacji do oszczędzania energii wśród użytkowników (brak urządzeń regulacyjnych) oraz systemu indywidualnego rozliczania odbiorców, Norwicz [63].

Wynikiem tego stanu jest stosunkowo niska efektywność wykorzystania energii w stosunku do powierzchni mieszkalnej, co z kolei wskazuje na wysoki potencjał oszczędności energetycznej. Dlatego, redukcja zużycia energii jest powszechnie uważana za największe wyzwanie dla współczesnego przemysłu budowlanego, jak stwierdza Niezabitowska [62]. Aby sprostać temu wyzwaniu, rozpoczęto, szczególnie w sektorze mieszkaniowym, działania mające na celu obniżenie energochłonności poprzez wprowadzenie standardów budownictwa energooszczędnego. Taki rodzaj budownictwa charakteryzuje się zmniejszonym zużyciem energii oraz zwiększonym wykorzystaniem energii odnawialnych do pokrycia zapotrzebowania energetycznego. Jednym ze sposobów na zmniejszenie zużycia energii w sektorze komunalno-bytowym, jest zwiększenie ilości projektowanych budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię, tzw. niskoenergetycznych, Stachowicz [89]. Realizacja tego celu przyczyni się również do zmniejszenia ilości emisji gazów cieplarnianych. Planowane jest, aby wszystkie budynki, które będą wybudowane po roku 2020, spełniały wysokie standardy energooszczędności i były zasilane w dużej mierze poprzez energię wyprodukowaną z AZE, Niezabitowska [62]. Coraz to większe znaczenie będą miały tutaj osiedlowe sieci ciepłownicze zasilające obszary miejskie poprzez wykorzystanie energii wyprodukowanej z odnawialnych źródeł energii, jak np. biomasa.

Stworzony w roku 1998 przez amerykańską organizację certyfikat LEED (The Leadership in Energy and Environmental Design) ma na celu podjęcie działań na rzecz budownictwa ekologicznego. LEED to zbiór zasad określających warunki budowy mieszkalnictwa przyjaznego środowisku i energooszczędnego. Do jednych z najbardziej zaawansowanych form budownictwa energooszczędnego należą tzw. domy pasywne. Feist [30] definiuje budynki pasywne jako budynki o zerowym zapotrzebowaniu na energię cieplną, które wynika z ekstremalnie dobrej izolacji cieplnej. Domy pasywne oferują komfort cieplny mieszkańców przy zapotrzebowaniu na energię cieplną mniejszym niż 15 kWh/m<sup>2</sup>a (Rys. 1-2) oraz zapotrzebowaniu na energię pierwotną, łącznie z ciepłą wodą i energią elektryczną, poniżej 120 kWh/m<sup>2</sup>a. Nazwa „budynek pasywny” odnosi się do faktu, że do ogrzewania budynku

wykorzystywana jest energia cieplna powstająca w sposób „pasywny” – pochodząca z zysków z promieniowania słonecznego oraz ciepła od osób i urządzeń – bez wykorzystania „aktywnych” systemów ogrzewania, Szymiec [100]. W domach takich ważny jest bilans pomiędzy stratami ciepła a jego pozyskiwaniem. W przypadku domów o niedostatecznej izolacji, straty przenikania ciepła (straty ciepła poprzez ściany, okna i dachy) są za duże, aby mogły być zrekompensowane przez zyski ciepła od promieniowania słonecznego i wewnętrzne (ciepło od ludzi, urządzeń). W domu pasywnym natomiast, zwiększenie zysków ciepła od nasłonecznienia uzyskuje się poprzez powiększoną powierzchnię oszkloną na stronie południowej. Natomiast straty przenikania ciepła zredukowane są do minimum poprzez efektywną izolację cieplną.

Budynki jeszcze bardziej energooszczędne niż budynki pasywne, to budynki niemalże zero energetyczne i dodatnio energetyczne. Budynek o niemalże zerowym zużyciu energii jest w pewnym stopniu kontynuacją idei domu pasywnego. O domu takim mówimy wówczas, gdy całkowite zużycie energii jest zrównoważone poprzez pozyskiwanie energii z innych źródeł (pompy ciepła, energia słoneczna, itp.). Z kolei dom dodatnio energetyczny to budynek, który więcej energii produkuje niż zużywa.

W porównaniu do budynków pasywnych, zero i dodatnio energetycznych, większość budynków posiada o wiele gorszy standard energetyczny, co prowadzi do znacznie większego zużycia energii cieplnej. Jednym ze sposobów na zmniejszenie zapotrzebowania na energię cieplną potrzebną do ogrzewania budynków, opisanego w pracy Kukły i innych [52], jest tzw. termomodernizacja istniejących budynków, głównie poprzez zmianę izolacyjności przegród. Ocieplenie budynku, a także montaż zaworów termostatycznych, takich jak np. regulatory pogodowe, które cechują profesjonalną termomodernizację, stwarza możliwości ograniczenia zużycia energii i kosztów eksploatacyjnych [14]. Racjonalizacja zużycia energii w ogrzewnictwie wspiera także wprowadzanie nowych regulacji prawnych. Przykładem takich działań jest ustawa z dnia 18 grudnia 1998 roku, o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacji mająca na celu:

- zmniejszenie zużycia energii na potrzeby ogrzewania oraz podgrzewania wody użytkowej,
- zmniejszenie strat energii w lokalnych sieciach ciepłowniczych i zasilających je lokalnych źródłach ciepła,
- całkowitą lub częściową zmianę konwencjonalnych źródeł energii na źródła niekonwencjonalne, w tym wykorzystujące energie odnawialne.

Termomodernizacja wraz z wdrożeniem standardu budownictwa niskoenergetycznego, modernizacją węzłów i instalacji wewnętrznej w celu wzrostu sprawności wykorzystania ciepła, wprowadzeniem systemu indywidualnego rozliczania odbiorców ciepła przy użyciu podzielników kosztów, oraz oszczędnością energii przez odbiorców poprzez obniżenie komfortu cieplnego, prowadzą w efekcie końcowym zarówno do spadku zamówionej mocy i odbieranego ciepła z sieci ciepłowniczej.

Z racjonalizacją wykorzystania energii łączy się zminimalizowanie zapotrzebowania na energię, które znajduje swoje odzwierciedlenie w budynkach energooszczędnych. Stępień [90], proponuje podjęcie działań w kierunku zmniejszenia strat cieplnych do otoczenia

poprzez termomodernizację, w celu efektywnej realizacji pokrycia zapotrzebowania na ciepło grzewcze. Wprowadzenie takiego kierunku spowodowane jest faktem, iż to właśnie standard energetyczny ma decydujący wpływ na zapotrzebowanie budynków mieszkalnych na ciepło grzewcze. Wymagania związane z racjonalizacją zużycia energii w mieszkalnictwie związane są z oszczędnością energii i izolacyjnością cieplną przegród budowlanych. Wymagania te stawiane są trzem grupom budynków:

- budynkom mieszkalnym wielorodzinnym i zamieszkaniami zbiorowym,
- budynkom jednorodzinnym,
- budynkom użyteczności publicznej i budynkom produkcyjnym.

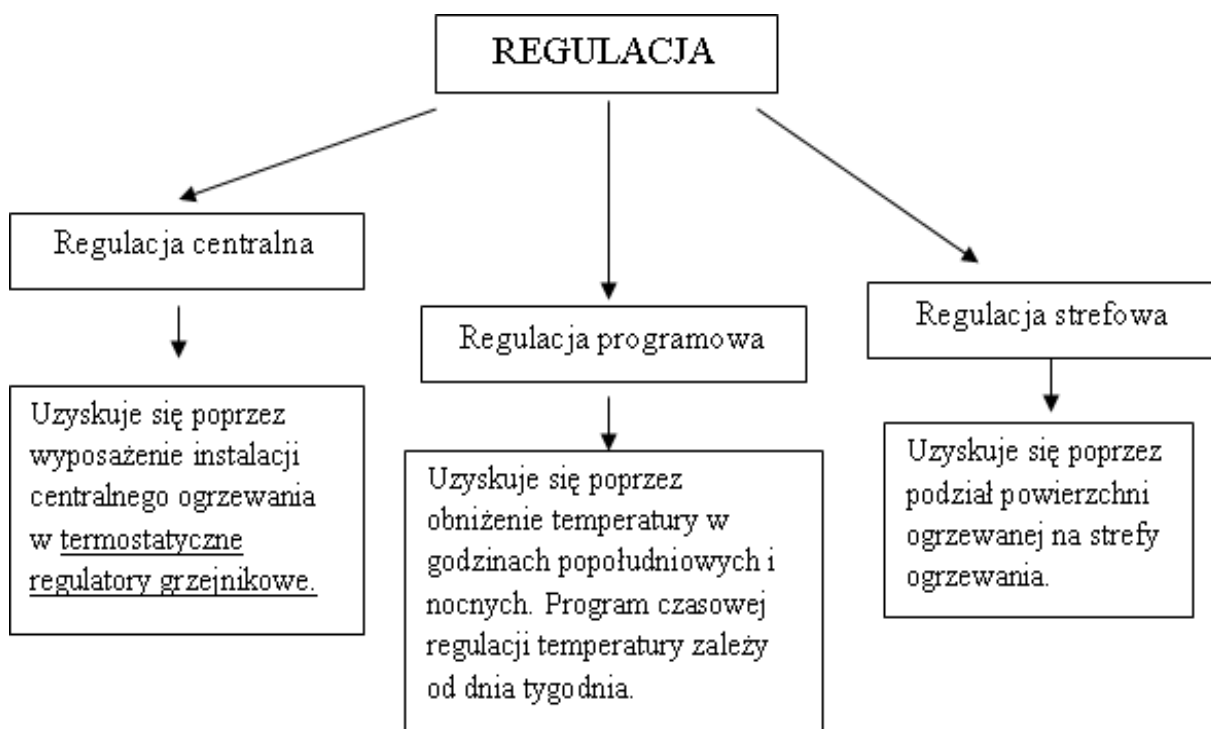
Podstawowym czynnikiem warunkującym wysokość zapotrzebowania na energię cieplną na danym terenie jest nie tylko wielkość i standard energetyczny jego zabudowań, ale również liczba i sposób zachowania jego mieszkańców. W przeciwieństwie do budynków starszych, budynki nowsze, szczególnie budynki niskoenergetyczne (zużycie energii poniżej 70 kWh/m<sup>2</sup>a) i pasywne, posiadające dobrą izolację termiczną i wyposażone w innowacyjne systemy grzewcze i wentylacyjne, są konstruowane przy uwzględnieniu aspektu minimalizacji zużycia energii cieplnej. W przypadku budynków charakteryzujących się niską energochłonnością, jednym z głównych czynników wpływających na końcowe zapotrzebowanie na ciepło jest zachowanie konsumentów w zakresie zużycia energii, Santin i inni [79]. Dlatego w budynkach niskoenergetycznych, ważnym sposobem umożliwiającym dodatkową redukcję zużycia energii cieplnej jest zmiana zachowań mieszkańców. Studia literaturowe, Branco i inni [10], wykazały, że zachowania mieszkańców mają decydujący wpływ na występowanie różnic w zużyciu energii pomiędzy poszczególnymi budynkami. Już poprzez zastosowanie bardzo prostych metod, takich jak lepsza regulacja systemu ogrzewania, czy też obniżenie komfortu cieplnego użytkowników, możliwe jest osiągnięcie sporych oszczędności energii cieplnej. Z drugiej jednak strony, poprzez niewłaściwe zachowania użytkowników, spowodowane nieznaną zależnością pomiędzy zapotrzebowaniem na ciepło a regulacją temperatury wewnętrznej i wentylacją, osiągnięcie tych oszczędności może być znacznie utrudnione.

W pracy Richtera [74], zanalizowany został wpływ zachowań użytkowników na zużycie energii cieplnej w budynkach pasywnych i niskoenergetycznych. Z badań tych wynika, że zachowania użytkowników mają znaczny wpływ na zużycie energii. To użytkownik definiuje swoje wymagania jeśli chodzi o temperaturę wewnętrzną pomieszczenia, jak też decyduje o zużyciu energii cieplnej na podgrzanie wody. W kolejnej pracy zbadany został wpływ standardu energetycznego budynku, jak i zachowań jego użytkowników na koszty energii cieplnej, [43]. Stwierdzono, że niezależnie od standardu energetycznego budynków, zachowania użytkowników (użytkownik oszczędny lub rozrzutny) mogą prowadzić do zmian w zużyciu energii dochodzących nawet do 50%.

W ramach projektu EnSan [26], zrealizowana została całkowita termomodernizacja kompleksu budynków, tak aby spełniały one kryteria budynków niskoenergetycznych. Równocześnie, badania te uwzględniły analizę wpływu zachowań użytkowników. Aby zrealizować to zadanie, w poszczególnych mieszkaniach zainstalowano rejestratory zużycia energii cieplnej, dzięki którym możliwy był monitoring zapotrzebowania energetycznego

wraz z wizualizacją aktualnie zmierzonych wartości. Dodatkowo, systemy te pozwoliły na ustalenie przyczyn zwiększonego zużycia energii oraz informacje o możliwości jego redukcji. Wszystkie informacje dotyczące ogrzewania, wentylacji, jak i zachowań użytkowników monitorowane były w sezonie grzewczym 2003/2004, poprzez zespół badawczy uczelni technicznej w Karlsruhe. Dane te, w kolejnym kroku, poddane zostały obróbce, tak aby na ich podstawie możliwe było opracowanie szczegółowych bilansów energetycznych. W efekcie końcowym, zmierzone wartości przekazywane były użytkownikom monitorowanych budynków, tak aby zachęcić ich do oszczędnej gospodarki energią. Eksperyment ten udowodnił, iż możliwe było zredukowanie zużycia energii dzięki przekazaniu użytkownikom informacji o ich faktycznym zużyciu energii i wskazaniu możliwości jej redukcji. W pracy tej udowodniono, że użytkownicy są w stanie zmienić swoje zachowanie tylko w przypadku, gdy informacje są im przekazywane w łatwo dostępny i zrozumiały dla nich sposób. Dlatego, sposób użytkowania budynków mieszkalnych czy też szerzej osiedli to ważny aspekt, który powinien być uwzględniony podczas analizy zużycia energii cieplnej oraz jej dystrybucji.

Jedną z możliwości redukcji zużycia energii cieplnej poprzez wpływanie na zachowania użytkowników, jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego. Sterowanie i kontrola zjawisk cieplno-przepływowych odbywa się poprzez zastosowanie automatycznych urządzeń zaopatrzonych w czujniki temperatury zewnętrznej i wewnętrznej, które sterują instalacjami ogrzewania. Pomiary temperatur wykonuje się w celu wyznaczenia strategii sterowania adaptacyjnego. Dzięki sterowaniu adaptacyjnemu, możliwa jest analiza wpływu zachowań mieszkańców na zużycie energii cieplnej. Regulację temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach można podzielić na 3 typy (Rys. 1-3):



Rys. 1-3: Typy regulacji, Plutecki [66].

- regulacja centralna odbywa się w kotłowni lub w węźle ciepłowniczym. Stosowana jest w przypadku, gdy nie występują duże zmiany obciążenia cieplnego ogrzewanych pomieszczeń. Zwiększenie jakości regulacji temperatury w ogrzewanym pomieszczeniu uzyskuje się poprzez wyposażenie instalacji ogrzewania w termostatyczne regulatory grzejnikowe.
- regulacja programowa zalecana jest w budynkach mieszkalnych, ponieważ może przyczynić się do znacznych oszczędności zużycia energii na skutek obniżenia temperatury w godzinach popołudniowych i nocnych. Program czasowej regulacji temperatury w budynkach mieszkalnych zależy od dnia tygodnia. Ustala się go inaczej dla dni roboczych, a inaczej dla dni wolnych od pracy.
- regulacja strefowa uzyskiwana jest poprzez podział powierzchni ogrzewanej na strefy ogrzewania o różnych temperaturach wewnętrznych. Jest to kolejny element, który umożliwia ograniczenie zużycia energii cieplnej.

Jeśli chodzi o wyznaczenie zapotrzebowania na energię cieplną, stosuje się wiele metod, począwszy od certyfikatów energetycznych (tzw. świadectw energetycznych), aż po automatyczne obliczenia przy pomocy modeli symulacyjnych. Świadectwa energetyczne dotyczą charakterystyki energetycznej budynku, a samo pojęcie charakterystyki energetycznej budynku zostało wprowadzone w dyrektywie EPBP (ang. Energy Performance of Buildings Directive), [27]. Dyrektywa ta przedstawia ogólną metodykę obliczania charakterystyki energetycznej budynków oraz wprowadza pojęcie świadectwa charakterystyki energetycznej budynku. Unia Europejska nakłada obowiązek sporządzania takiego dokumentu dla wszystkich zasobów budowlanych. Świadectwo takie mówi o zapotrzebowaniu na nieodnawialną energię pierwotną, zapotrzebowaniu na energię końcową oraz obejmuje uwagi w zakresie możliwości zmniejszenia zapotrzebowania na energię końcową.

W Polsce stosowane metody obliczeniowe zapotrzebowania na c.w.u. wykorzystują zależności i modele opracowane jeszcze w ubiegłym wieku, często na podstawie badań i pomiarów [109]. Również w przypadku prognozowania zapotrzebowania na ciepło grzewcze, stosowane metody nie są wystarczająco efektywne w celu redukcji jego zużycia. Plutecki [66] wskazuje na konieczność wprowadzenia modeli teoretycznych, a nawet modeli symulacyjnych, które mogą przyczynić się do rozwiązania problemów związanych z kontrolą zjawisk ciepło-przepływowych w ogrzewanym pomieszczeniu. Modele takie, powinny ułatwić analizę i odzwierciedlenie skomplikowanego ze względu na zmieniające się warunki meteorologiczne, procesu wymiany ciepła. Również takie czynniki, jak rodzaj ogrzewania, charakterystyka budynku, a nawet sposób jego użytkowania mają zróżnicowany wpływ na zachodzącą wymianę ciepła pomiędzy ogrzewanym pomieszczeniem a środowiskiem zewnętrznym. Dotychczasowe prace, które dotyczą zjawisk ciepło-przepływowych w ogrzewanym pomieszczeniach, uwzględniają tylko nieliczne aspekty tych zjawisk, wprowadzając jednocześnie sporo założeń i uproszczeń. Dotyczą one głównie parametrów charakterystyki energetycznej, a także sposobu użytkowania analizowanych pomieszczeń. Efektem wielu założeń w tego rodzaju modelach są spore różnice pomiędzy wartościami obliczeniowymi i zmierzonymi. Fakt ten wskazuje, iż dalsze prace badawcze w tym kierunku



będą konieczne, a w szczególności konieczna będzie szersza analiza procesu wymiany ciepła, rozpatrywanych w różnych skalach czasowych, np. w ciągu doby.

Przeprowadzenie badań symulacyjnych przy wykorzystaniu odpowiednich modeli pozwoli zatem obliczyć zmienne w czasie zapotrzebowanie na energię cieplną dla poszczególnych odbiorców sieci ciepłowniczej, jak i również całej sieci grzewczej zasilającej tych odbiorców. Symulacja odbędzie się w oparciu o różne stopnie szczegółowości dotyczące z jednej strony rodzaju wykorzystywanego modelu (statyczny, dynamiczny), z drugiej zaś, ze względu na dostępność danych wejściowych. Badania pozwolą także uzyskać charakterystyki dla różnych zakłóceń wpływających na działanie całej sieci grzewczej, jak np. zachowanie użytkowników. Redukcja temperatury powietrza wewnętrznego, zwiększenie wewnętrznych zysków ciepła, czy też zwiększenie zysków ciepła od promieniowania słonecznego, mogą przyczynić się do znacznej redukcji zapotrzebowania na ciepło grzewcze całej sieci grzewczej, a co za tym idzie, ograniczyć produkcję tej energii. Pozwoli to w efekcie końcowym, wpłynąć na redukcję emisji gazów cieplarnianych.

## **2 Przegląd metod prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą**

Wyznaczenie potencjału oszczędnościowego energii cieplnej sieci grzewczych osiedli/obszarów miejskich zależy w głównej mierze od zużycia energii cieplnej jej poszczególnych odbiorców, jak i jego zmian w przyszłości. Zastosowanie metod symulacyjnych do prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą jest jedną z najważniejszych metod optymalizacji pracy systemów ciepłowniczych. Szmit [98] uważa prognozowanie za narzędzie, które jest niezbędne jeśli chodzi o nowoczesne zarządzanie. Prognozowanie zapotrzebowania na energię ciepłą odgrywa szczególną rolę w przypadku sektora energetycznego, Bojarski [7], Marecki [55]. Z uwagi na popyt na energię ciepłą, który jest zmienny w czasie, prognozowanie jego zapotrzebowania może przyczynić się do sporych oszczędności energii. Na przykład w okresie lata, kiedy zapotrzebowanie na energię ciepłą nie jest takie wysokie jak zimą, ponieważ wyprodukowana energia ciepła wykorzystywana jest głównie dla przygotowania ciepłej wody użytkowej, dochodzi zazwyczaj do jej nadprodukcji. Z uwagi na to, że magazynowanie energii cieplnej jest procesem skomplikowanym, nadwyżka energii wyprodukowana latem prowadzi do zwiększenia strat energii. Biorąc pod uwagę sieci ciepłownicze wielkich osiedli czy miast, straty te mogą być ogromne. Zrównoważony rozwój ciepłownictwa jest ściśle związany z poprawą efektywności energetycznej w systemach ciepłowniczych, która powinna być poprzedzona opracowaniem szczegółowych planów na podstawie prognozy przyszłościowego zapotrzebowania na energię ciepłą, Wojdyga [108]. Właściwa prognoza zapotrzebowania na energię ciepłą może przyczynić się do znacznej redukcji zużycia paliw, a co za tym idzie zmniejszona emisja substancji szkodliwych będących efektem procesu spalania.

### **2.1 Opis istniejących metod**

W celu wyznaczenia zapotrzebowania na energię ciepłą dla odbiorców sieci grzewczych w normie [67] proponuje się dwie podstawowe metody:

- na podstawie obliczeń wykonywanych przy założeniu znormalizowanych warunków użytkowania budynku i klimatu zewnętrznego,
- na podstawie ekstrapolacji pomiarów ilości energii cieplnej rzeczywiście dostarczanej do instalacji grzewczej budynku.

Metody obliczeniowe zapotrzebowania na ciepło grzewcze można podzielić na proste modele adaptacyjne, które przeznaczone są głównie do krótkoterminowych prognoz, modele oparte na dekompozycji procesu zapotrzebowania na część stochastyczną i deterministyczną oraz modele wykorzystujące sieci neuronowe [1]. Modele adaptacyjne bazują na informacjach z przeszłości, które dotyczą zarówno zmiennej prognozowanej, jak i błędów prognoz, Tłuczak [102].

Model oparty na dekompozycji procesu zapotrzebowania na część stochastyczną i deterministyczną, wynika ze złożoności procesu zapotrzebowania na energię, który charakteryzuje się m.in. sezonowością (w obrębie roku), okresowością (tygodniową) i quasi-

okresowością (dobową), Misiorek i Piesiewicz [60]. Przykład tego typu modeli przedstawiono w pracy Misiorka i Weron [61], gdzie proponuje się tok obliczeniowy modelowania sezonowości.

Z kolei metoda bazująca na wykorzystaniu sieci neuronowych oparta jest na wykorzystaniu sieci neuronowych jako uniwersalnych aproksymatorów, jako że sieć neuronowa jest w stanie przeprowadzić aproksymację dowolnego zjawiska [24]. Sieci takie jednak, ze względu na wynikające problemy z ich zastosowania (np. trudne do opisanie matematycznego), stosuje się zazwyczaj w sytuacjach, kiedy zawodzą bardziej tradycyjne metody, takie jak modelowanie matematyczne [24], wykorzystane np. w pracach Blesl [3] i [4], Firth i inni [33] i [34].

Większość z wyżej wymienionych metod opiera się na agregacji wartości zapotrzebowania na energię ciepłą poszczególnych obiektów infrastruktury miast. Najprostsze z nich to audyty energetyczne (określane też jako ekspertyzy), w których audytor posługuje się tzw. metodą diagnostyczną, polegającą na szacowaniu wartości określonych parametrów. Wadą tej metody jest ograniczona możliwość jej zastosowania, pozwalająca jedynie na prognozowanie zużycia energii cieplnej pojedynczych obiektów. W przypadku prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą całych aglomeracji miejskich, czy też sieci grzewczych osiedli taki sposób postępowania jest zbyt pracochłonny i potrzebne są nowe metody, które pozwolą dokonać identyfikacji wszystkich obiektów rozpatrywanych obszarów. Roth i inni [77] wymienia metody najpowszechniej stosowane, takie jak metody oparte na typizacji budynków i osiedli mieszkalnych, których główną zaletą jest stosunkowo prosta struktura. Metoda oparta na typizacji osiedli mieszkalnych należy do najprostszych z uwagi na to, że prognoza zapotrzebowania na energię ciepłą wyznaczana jest w oparciu o obszary osiedla o różnych wielkościach, Blesl [3]. Metoda ta nie traktuje więc każdego obiektu osiedla z osobna, ale prowadzi do ich agregacji w obszary, które definiowane są np. w zależności od wieku obiektów budowlanych.

Podobna do wyżej opisanej metodyka prognozowania zużycia energii cieplnej zastosowana została przez Firth i inni [33], gdzie oszacowanie zapotrzebowania na energię ciepłą dokonywane jest w oparciu o różne kategorie obiektów. Ulepszeniem tej metody w porównaniu do metody typizacji osiedli, jest przyporządkowanie analizowanym kategoriom obiektów posiadających podobne charakterystyki energetyczne. W metodzie zastosowanej przez Firtha i innych [33], zapotrzebowanie na energię ciepłą obliczane jest dla przeciętnego obiektu z każdej kategorii, a wyniki obliczeń mnożone są następnie przez ilość obiektów, należących do niej. Większa dokładność prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą możliwa jest poprzez wykorzystanie metody opartej na typizacji obiektów, w której zapotrzebowanie na energię ciepłą oblicza się dla każdego obiektu oddzielnie. W metodzie tej brane są pod uwagę informacje dotyczące powierzchni ogrzewanej, ilości pięter oraz ewentualnie kubatury każdego rozpatrywanego obiektu, a zapotrzebowanie na energię ciepłą obliczane jest na podstawie przyporządkowania każdego z nich do odpowiedniego typu.

Dosyć zaawansowaną metodę proponuje Blesl [4], który wykorzystuje informacje, takie jak powierzchnia rzutu i wysokość obiektu, wyznaczone przy pomocy tzw. skaningu laserowego. Informacje te analizowane są przy użyciu systemów geoinformacyjnych.

Lotniczy skaning laserowy LIDAR (Light Detection and Ranging) stanowi nowoczesną technologię wykorzystywaną do celów pozyskiwania informacji w procesie tworzenia numerycznego modelu terenu, Borowiecki [8]. Dzięki temu pomiarowi, możliwe jest uzyskanie punktów opisanych współrzędnymi X,Y, H (długość i szerokość geograficzna, oraz wysokość punktu nad poziomem morza). Metody filtracji umożliwiają następnie podział zmierzonych punktów laserowych na punkty dolne i górne pozwalające na wyznaczenie wysokości obiektów znajdujących się na powierzchni ziemi, Strzałka i inni [94]. Duże obiekty, jak na przykład budynki, stanowią szczególne wyzwanie jeśli chodzi o proces filtracji danych, Hahn [39]. Dane te, w połączeniu np. z powierzchniami rzutu analizowanych obiektów, które mogą być pobrane z map terenu, stanowią dobrą bazę danych umożliwiającą przeprowadzenie prognozy zapotrzebowania na energię cieplną.

Ogólnie rzecz biorąc, większość dotychczas stosowanych metod prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną obszarów zurbanizowanych, bazuje na technologii geoinformacyjnej, jak prace Jones i inni [46] i Blesl [4]. Wyznaczenie geometrii poszczególnych obiektów stanowi bowiem jedno z najistotniejszych wyzwań, jeżeli chodzi o przeprowadzenie prognozy zapotrzebowania na energię cieplną sieci grzewczych całych aglomeracji miejskich. Wyżej opisana metoda skaningu laserowego, wykorzystana została np. przez Blesl [4] oraz Duran i Özlem [21], gdzie przy użyciu odpowiednich operacji obliczeniowych i odpowiedniej filtracji danych, wyznacza się kubatury poszczególnych obiektów. W przeciwieństwie do wyżej opisanego sposobu wyznaczania geometrii obiektów, w większości przypadków geometrie wyznaczane są poprzez odczyt z planów i map. Wymagane do symulacji geometrie wyznacza się np. poprzez określenie długości, szerokości analizowanych obiektów, ilości pięter oraz części powierzchni przezroczystych danego obiektu, Junghaus [47]. Sposób ten jest jednak w przypadku prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną osiedli mieszkalnych lub aglomeracji miejskich zbyt czasochłonny i wymaga sporego nakładu pracy.

W celu przyporządkowania parametrów cieplnych, takich jak współczynnik przenikania ciepła przegród U, każdemu z analizowanych obiektów osiedla, wykorzystuje się kombinację danych, składającą się z kubatury ogrzewanej obiektu, wyznaczonej np. przy użyciu metody skaningu laserowego w połączeniu z informacją dotyczącą typu danego obiektu. Charakterystyczne dla każdego typu obiektu wartości współczynnika przenikania ciepła przegród U są w ten sposób przydzielone do wyznaczonych geometrii obiektów. Z uwagi na to, że metoda ta jest niezbyt dokładna, stosuje się dodatkowo bardziej dokładną, ale też bardziej pracochłonną metodę termowizji. Metoda termowizji umożliwia weryfikację wyznaczonych metodą przyporządkowania obiektów do danego typu, współczynników U, jak np. w pracy Blesla [4]. Badania termowizyjne stosowane są w budownictwie i pozwalają na ocenę efektywności izolacyjności cieplnej budynków. W latach 80-tych i 90-tych powszechnie stosowano badania metodą termowizyjną do przeprowadzenia analiz mikroklimatycznych. W dzisiejszych czasach istnieją już nowoczesne systemy analizy termowizyjnej, które dzięki wysokiej rozdzielczości, umożliwiają zidentyfikowanie nawet nieznacznych strat ciepła przez powierzchnie zewnętrzne badanych obiektów.

Po wyznaczeniu geometrii (powierzchnie przegród) i parametrów cieplnych (współczynnik  $U$ ), dane te wykorzystywane są jako dane wejściowe do modeli obliczeniowych zapotrzebowania na energię cieplną. Wadą dotychczas stosowanych metod prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną sieci grzewczych jest niezadowalająca dokładność otrzymanych wyników. Spore odchyłki pomiędzy wartościami obliczeniowymi i zmierzonymi zapotrzebowania/zużycia energii cieplnej wynikają w pierwszej kolejności z braku wystarczającej dokładności danych wejściowych (geometrie, parametry cieplne), dlatego główny nacisk położony jest w niniejszej pracy na wypracowaniu metody umożliwiającej efektywne pozyskiwanie tych danych dla wszystkich odbiorców sieci grzewczych osiedli. W przypadku, gdy dane te są dokładnie wyznaczone, a odchyłki pomiędzy wartościami obliczeniowymi a zmierzonymi są nadal spore, rozbieżności te mogą być efektem różnych zachowań użytkowników. Praca Kasperkiewicza [48] wskazuje, że sposób zachowania poszczególnych odbiorców sieci grzewczych jest częstym powodem występowania różnic pomiędzy szacowanym zapotrzebowaniem na energię cieplną a wartością zmierzoną.

Jak wynika z opisu wyżej wymienionych metod prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną, wymagane jest nie tylko dokładne wyznaczenie charakterystyk energetycznych analizowanych obiektów przyłączonych do sieci grzewczych osiedli miejskich, ale również wykorzystanie odpowiedniego modelu obliczeniowego, ewentualnie symulacyjnego. W zależności od dostępności danych wejściowych, stosuje się różne metody obliczania zapotrzebowania na energię cieplną. Najprostszą z nich jest tzw. metoda stopniodni, wykorzystana np. w pracach Sarak i Satman [80] oraz Jaffal i innych [44], która polega na obliczeniu zapotrzebowania na energię cieplną w oparciu o różnicę pomiędzy temperaturą wewnętrzną a zewnętrzną dla danego odbiorcy, jak i średniej wartości współczynnika przenikania przegród  $U$ . Można zatem powiedzieć, że metoda ta uwzględnia jedynie straty ciepła przez przenikanie, przy założeniu, że straty wentylacyjne rekompensowane są przez zyski wewnętrzne i słoneczne.

W literaturze (Heim i Panek [40]) stosuje się podział metod obliczania zapotrzebowania na energię cieplną na dwa zasadnicze rodzaje metod: quasi-statyczne, bądź dynamiczne. Metody quasi-statyczne określają bilans cieplny dla odpowiednio długiego okresu obliczeniowego (najczęściej jednego miesiąca lub sezonu grzewczego). Należą do nich tzw. miesięczne metody bilansowe obliczania zapotrzebowania na energię cieplną wykorzystywane do określania charakterystyki energetycznej badanych obiektów, które uwzględniają zarówno straty ciepła przez przenikanie i wentylacyjne, jak i zyski słoneczne i wewnętrzne. Modele takie mają zazwyczaj charakter statyczny i opierają się na bilansach energetycznych, których tok obliczeń definiuje się na podstawie powszechnie stosowanych standardów, norm i dyrektyw europejskich [17], [18], i innych. Model matematyczny, który uwzględnia wymiary geometryczne, strukturę przegród budowlanych, nasłonecznienie, infiltrację, temperaturę zewnętrzną i wewnętrzną zaproponował Glueck [37]. Istnieje jednak wiele prac, jak np. praca Blesl [4], w których wykorzystuje się modele obliczeniowe o charakterze statycznym oparte o Normę Europejską DIN 12831 [17].

W listopadzie 2009 r. opublikowana została polska wersja normy PN-EN ISO 13790 [70], która jest również wspomagana normą PN EN 12831 [69]. W tym momencie zakończył się okres korzystania z normy PN-B-02025 [68] jako podstawy do obliczania zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynków w audytach energetycznych budynków. Norma ta stanowiła podstawę metody wprowadzonej do sporządzania świadectw energetycznych [78], jednak w szczegółach różni się od tej metody oraz wprowadza inne definicje, oznaczenia, symbole i jednostki. Norma 13790 [70] dotyczy wszystkich budynków, a nie tylko mieszkalnych, a obliczenia zapotrzebowania energii przeprowadza się w formie bilansu obejmującego straty i zyski ciepła w obszarze budynku. Norma zawiera trzy metody obliczeń: metodę sezonową, metodę miesięczną i prostą metodę godzinową, którą zaliczyć już można do metod dynamicznych uwzględniających ciepło akumulowane w masie budynku i uwalniane z masy budynku. Metody dynamiczne stosowane są najczęściej w przypadku symulacji krótszych okresów czasu, jak np. jednej godziny. Zaletą tych modeli jest możliwość uwzględnienia akumulacji ciepła w ścianach badanego obiektu. Metoda ta jest odpowiednia, gdy chcemy uwzględnić zmienne w ciągu dnia użytkowanie badanego obiektu. Dlatego stosowanie tej metody obarczone jest zazwyczaj mniejszym błędem niż w przypadku metody quasi-statycznej.

Analiza wpływu zachowań użytkowników na zużycie /zapotrzebowanie energii cieplnej to ważny aspekt, który ma szczególne znaczenie w przypadku poprawy efektywności systemów grzewczych. Jest to konsekwencja znacznej poprawy standardu energetycznego obiektów infrastruktury miejskiej, którą można zaobserwować w ostatnich latach. Pomimo tego, wpływ zachowań użytkowników na zużycie energii cieplnej jest zazwyczaj niedokładnie uwzględniany w modelach energetycznych, Shimoda i inni [82]. Dotychczasowe prace wprowadzają do modeli energetycznych standardowe parametry użytkowe lub bazują na tzw. harmonogramach czasowych użytkowania. Fakt ten wskazuje, iż aspekt ten jest wciąż zbyt ogólnikowo potraktowany i dalsze prace oraz badania w tym kierunku są konieczne.

Słabym punktem większości dotychczas opracowanych metod prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą jest brak danych do weryfikacji. Według Matthews i inni [56], powodzenie procesu tworzenia modelu zależy od możliwości jego weryfikacji. Jednakże, proces weryfikacji wyników obliczeniowych jest często pomijany z powodu trudności związanych z pozyskaniem danych pomiarowych. W pracy Diamond i inni [16], aktualny stan zużycia energii cieplnej porównany jest do obliczonego zapotrzebowania na energię ciepłą, ale tylko dla kilku obiektów. Praca Seppänen [81] natomiast, prezentuje model prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą dla całych aglomeracji miejskich, ale wyniki z tego modelu porównane są tylko z wartościami statystycznymi. Ograniczona możliwość pozyskania danych umożliwiających weryfikację zapotrzebowania na ciepło systemów grzewczych aglomeracji miejskich sprawia, iż określenie dokładności stosowanych dotychczas metod w praktyce, nie jest możliwe. Z tego też względu, zaletą niniejszej pracy jest możliwość przeprowadzenia weryfikacji wypracowanej metodyki nie tylko dla pojedynczych odbiorców, ale i dla całej sieci grzewczej analizowanego osiedla miejskiego, gdyż dostępne są dane pomiarowe dla niemalże wszystkich jej odbiorców. Dodatkowo możliwe jest przeprowadzenie weryfikacji na różnych poziomach szczegółowości dotyczącej

rodzaju modelu (zależne od wprowadzanych danych geometrycznych i cieplnych), jak ich dostępności danych pomiarowych.

Większość stosowanych powszechnie metod prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą systemów grzewczych wymaga bardzo wielu danych wejściowych, Mavrogianni i inni [57]. Poziomą szczegółowość danych wejściowych z kolei, zależy głównie od ich dostępności. Jest to bardzo istotny aspekt w przypadku, gdy celem prowadzonych analiz jest prognoza zapotrzebowania na energię ciepłą całych sieci grzewczych osiedli miejskich. W pracy, Ratti i inni [73] wymieniono szereg trudności modelowania zapotrzebowania na energię ciepłą na większą skalę, czego wynikiem jest stosunkowo rzadkie stosowanie tego typu metodyki w praktyce. Ważne jest, aby osiągnąć dobry kompromis pomiędzy dokładnością modelowania a dostępnością danych. Według Robinson i inni [76], kryteria te stanowią podstawę do wybrania jak najbardziej odpowiedniej technologii modelowania. Skomplikowany model nie oznacza, że będzie on również lepszy; najlepszym modelem jest taki model, który osiągnie cel modelowania przy możliwie jak najmniejszej jego złożoności, Bossel i Hartmut [9].

W literaturze można spotkać wiele metod obliczeniowych, które jednak są zwykle ograniczone do przypadków szczególnych i nie uwzględniają bardzo szerokiego zakresu zmian z punktu widzenia skali przestrzennej (budynki pojedyncze, grupy budynków, osiedla i miasta) oraz stopnia szczegółowości dotyczącego skali czasowej (rok, sezon, miesiąc, dzień, godzina).

### 3 Cel i teza pracy

W świetle przedstawionych w poprzednich rozdziałach rozważań sformułowano cel i tezę pracy. Cel pracy przedstawia się następująco:

**Celem pracy jest wypracowanie metodyki umożliwiającej prognozowanie zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej osiedla miejskiego w oparciu o analizę różnych stopni szczegółowości dotyczących skali przestrzennej (budynek, grupa budynków, osiedle, miasto), jak i skali czasowej (godzina, dzień, miesiąc, sezon, rok).**

Osiągnięcie sformułowanego celu wymagało przeprowadzenia szeregu działań, z których zakresu wynikły następujące cele dodatkowe:

- wypracowanie metodyki pozyskiwania danych wejściowych dotyczących geometrii i parametrów cieplnych poszczególnych odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla, w celu wprowadzenia ich do modeli symulacyjnych,
- opracowanie modeli symulacyjnych (częściowe wykorzystanie dostępnych modeli symulacyjnych i dostosowanie ich do własnych potrzeb), które umożliwią prognozowanie zapotrzebowania na energię ciepłą w oparciu o różne stopnie szczegółowości dotyczące wprowadzanych danych wejściowych, jak i w oparciu o różne skale przestrzenne i czasowe,
- weryfikacja wypracowanej metodyki prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą przy użyciu rzeczywistych danych pomiarowych z monitoringu manualnego i automatycznego,
- opracowanie różnych konfiguracji parametrów użytkowych w celu wprowadzenia ich do modeli symulacyjnych.

Osiągnięcie celu głównego ma pozwolić na racjonalne zarządzanie siecią grzewczą osiedla miejskiego przy zastosowaniu dynamicznej reakcji strony zasilającej osiedla na zmiany warunków pogodowych oraz zmian zachodzących po stronie odbiorczej tego osiedla.

Plan pracy obejmuje:

1. Przegląd literaturowy w zakresie metod prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczych osiedli/miast, jak i teorii zjawiska wymiany ciepła pomiędzy ogrzewanym obiektem, a środowiskiem zewnętrznym. Dodatkowo, przeprowadzone są studia literaturowe, dotyczące zarządzania sieciami grzewczymi osiedli, w celu redukcji zużycia energii cieplnej.
2. Opracowanie modeli symulacyjnych.  
Opracowanie koncepcji metody prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla, przy wykorzystaniu danych z systemu informacyjnego (CAD, skaning laserowy, GIS).
3. Pomiar zużycia energii cieplnej dla poszczególnych odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla przy zastosowaniu monitoringu:
  - opracowanie monitoringu dla pomieszczenia testowego;



W celu wykazania dokładności działania zastosowanych w niniejszej pracy modeli symulacyjnych, wykorzystane jest specjalnie przygotowane pomieszczenie testowe, w którym zainstalowana jest aparatura do pomiaru temperatury wewnętrznej, jak i zużycia energii cieplnej tego pomieszczenia. Pomiary przeprowadzone są w interwale czasowym 5 minut dla kilkunastu dni.

- opracowanie monitoringu dla obiektu testowego;

W celu weryfikacji zasymulowanego zapotrzebowania na energię ciepłą w warunkach rzeczywistych, zainstalowany jest w jednym wybranym obiekcie danego osiedla, tzw. obiekcie testowym, specjalny automatyczny monitoring zużycia energii cieplnej. Monitoring umożliwia godzinowy pomiar zużycia energii cieplnej dla całego obiektu, jak i poszczególnych mieszkań.

- manualny odczyt;

W przypadku wszystkich odbiorców sieci grzewczej udostępnione są poprzez elektrociepłownię osiedla zinwentaryzowane dane dotyczące rocznego zużycia energii cieplnej dla okresu czasu od 2005-2009. Wartości te są wprowadzone w ramach niniejszej pracy do specjalnej bazy danych w celu ich dalszej analizy.

#### 4. Analiza uzyskanych danych zużycia energii cieplnej pod kątem:

- określenia charakteru problemów eksploatacyjnych sieci grzewczej osiedla,
- porównania wyników z wartościami docelowymi przyjętych standardów energetycznych,
- identyfikacji różnic w zużyciu energii cieplnej dla podobnych odbiorców energii cieplnej.

#### 5. Weryfikacja modeli symulacyjnych:

- ocena poprawności działania modeli w oparciu o pomieszczenie testowe,
- weryfikacja wartości obliczeniowych przy użyciu danych z automatycznego monitoringu dla jednego z odbiorców sieci grzewczej danego osiedla,
- porównanie rzeczywistych danych zużycia energii cieplnej dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej danego osiedla z wynikami z modeli symulacyjnych,
- analiza wpływu poszczególnych parametrów użytkowych na poziom zapotrzebowania na energię ciepłą.
- wybór optymalnej kombinacji parametrów użytkowych, która zapewni minimalizację zużycia energii.

W pracy przyjmuje się następującą tezę:

**Zastosowanie modeli symulacyjnych w połączeniu z systemem geoinformacyjnym do prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą jest efektywną metodą, która umożliwi racjonalne zarządzanie siecią grzewczą osiedla miejskiego w oparciu o różne stopnie szczegółowości dotyczące wprowadzanych danych wejściowych, jak i różnych skal czasowych i przestrzennych.**

## 4 Osiedle mieszkalne Scharnhauser Park

Niniejsza praca wykonana została dla obszaru, które jest osiedlem mieszkalnym o nazwie Scharnhauser Park (SHP) i znajduje się w mieście Ostfildern, niedaleko Stuttgartu. Obiekty na osiedlu SHP można podzielić na poszczególne kategorie:

- obiekty mieszkalne; tu z kolei wyróżnia się domy wielorodzinne (Rys. 4-1) oraz domy szeregowe jedno- i dwurodzinne (Rys. 4-2),
- budynki administracyjne,
- kilka budynków publicznych (np. szkoła, przedszkola).



Rys. 4-1: Budynki wielorodzinne [zdjęcie własne].



Rys. 4-2: Domy szeregowe jedno- i dwurodzinne [zdjęcie własne].

Biorąc pod uwagę standard energetyczny wszystkich obiektów, można podzielić je na trzy grupy. Do grupy 1 należą byłe baraki amerykańskich wojsk, charakteryzujące się niższym standardem energetycznym niż pozostałe budynki osiedla. Obiekty grupy 2 to domy szeregowe jedno- i dwurodzinne, a grupa 3 składa się z domów wielorodzinnych, które

charakteryzują się wysokim standardem energetycznym i należą do budownictwa niskoenergetycznego. W celu ograniczenia strat ciepła zimą, obiekty te poddane zostały w roku 2005 termomodernizacji. W tym samym czasie ustalono również, iż standard energetyczny wszystkich budynków osiedla będzie o 25% lepszy niż aktualnie obowiązujące standardy energetyczne (WSVO 1995). Standard ten zalecał wartości zapotrzebowania na energię cieplną w przedziale 70-100 kWh/m<sup>2</sup>a, w zależności od stosunku powierzchni przegród zewnętrznych do jego kubatury ogrzewanej, Eicker i inni [22]. Od roku 2002, kiedy to do użytku weszło nowe prawo energetyczne, tzw. EnEV 2002, zaleca się, aby elementy infrastruktury energetycznej zasilane poprzez energie odnawialne, tak jak ma to miejsce w SHP, były konstruowane jako energooszczędne. Dodatkowo, założono poprawę wymogu standardu prawa energetycznego EnEV 2002 o 40%; wartość 90 kWh/m<sup>2</sup>a powinna być zredukowana do 56 kWh/m<sup>2</sup>a dla odbiorców w lokalach mieszkalnych, i do 50 kWh/m<sup>2</sup>a dla odbiorców o charakterze użyteczności publicznej.

Prace prowadzone w ramach projektu POLYCITY w latach 2005-2011 miały na celu rewitalizację osiedla Scharnhauser Park. Rewitalizacja ta przyczyniła się do dalszego podwyższenia efektywności energetycznej infrastruktury osiedlowej i wzrostu udziału energii odnawialnych w produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Osiedle SHP o powierzchni zabudowy równej ok. 178 000 m<sup>2</sup> i liczące ok. 7 000 mieszkańców zasilane jest aktualnie w energię pochodzącą w 80% z energii odnawialnych, takich jak biomasa i energia słoneczna. Osiedle zasilane jest w głównej mierze poprzez elektrociepłownię zasilaną biomasą, widoczną na Rys. 4-3, która pokrywa 80% zapotrzebowania na energię cieplną i 50% zapotrzebowania na energię elektryczną osiedla, Strzalka i inni [96]. Elektrociepłownia ta wykorzystuje jako paliwo ścinki drzewne z prac porządkowych na terenach zielonych. Instalacja biomasowa pracuje zgodnie z zapotrzebowaniem na energię cieplną osiedla. Elektrociepłownia na biomasę stanowi główne źródło energii cieplnej osiedlowej sieci grzewczej, a zapotrzebowanie szczytowe pokrywane jest przy wykorzystaniu dwóch kotłów gazowych o mocy 9 i 5 MW. Sterowanie pracą kotłów zaprogramowane jest w sposób umożliwiający osiągnięcie wysokiego udziału biomasy w produkcji ciepła grzewczego, Fink [31], [32].



Rys. 4-3: Zdjęcie elektrociepłowni osiedla SHP [22].

Do skojarzonego wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej wykorzystuje się technologię ORC (Organic Rankine Cycle). W przypadku elektrociepłowni SHP jej głównym zadaniem jest pokrycie zapotrzebowania na ciepło całego osiedla. Produkowana w układzie skojarzonym energia elektryczna natomiast, pokrywa tylko część (50%) zapotrzebowania na energię elektryczną. W obiegu ORC elektrociepłowni Scharnhauser Park, wykorzystano olej silikonowy jako czynnik roboczy. Główną częścią układu elektrociepłowni jest kocioł biomasowy, który stanowi źródło ciepła układu ORC. Kocioł biomasowy należy traktować jako główną część układu kogeneracyjnego, gdyż sprawność wykorzystania energii chemicznej paliwa w kotle jest głównym czynnikiem determinującym całkowitą sprawność elektrociepłowni. Najważniejszym celem pracy instalacji biomasowej jest osiągnięcie jak najwyższej sprawności termicznej przy jednoczesnym zapobieganiu negatywnym zjawiskom, takim jak topnienie popiołu, towarzyszącym zwykle spalaniu biomasy drzewnej, Maraver i inni [54]. Zaletą technologii ORC jest możliwość efektywnej pracy w szerokim przedziale mocy – od 30 do 100% mocy znamionowej – co pozwala na uzyskanie stosunkowo wysokiej sprawności układu w przypadku, gdy moc na wyjściu jest silnie zmienna i zależy od zapotrzebowania na ciepło sieci grzewczej, Van Loo i Koopejan [105]. Dodatkowo, poniżej wymienione parametry techniczne i eksploatacyjne przemawiają za wykorzystaniem procesu ORC w elektrociepłowniach średniej mocy:

- wysoka dyspozycyjność (do 99% w skali roku);
- szeroki zakres stabilnej pracy (minimum technologiczne do 10% obciążenia nominalnego);
- korzystne warunki pracy turbiny (sprawność na poziomie 85%, brak zjawiska erozji łopatek wirnika, mała prędkość obrotowa);
- długi okres użytkowania jednostki;
- kompaktowa konstrukcja i prosta budowa mechaniczna;
- wysoki stopień zautomatyzowania, Skotnicki i Weisser [85].

Układy skojarzone na bazie procesu ORC stanowią więc obecnie najlepszą pod względem efektywności oraz dostępną na skalę komercyjną technologię pozwalającą na wykorzystaniu potencjału energetycznego biomasy drzewnej w instalacjach średniej mocy.

Elektrociepłownia Scharnhauser Park wyposażona jest w palenisko rusztowe o mocy 8 MW wyprodukowane przez austriacką firmę Kohlbach. Moc kotła termoolejowego wraz z ekonomizerem, które są źródłami ciepła obiegu termoolejowego, wynosi 6,3 MW. Instalacja biomasowa w czasie pracy przy pełnym obciążeniu spala około 200 m<sup>3</sup> ścinków drzewnych dziennie, a przewidywane roczne zużycie paliwa wynosi około 63000 m<sup>3</sup>. Energia cieplna wyprodukowana w elektrociepłowni ORC rozprowadzana jest do odbiorców poprzez sieć rurociągów, widoczną na Rys. 4-4.



**Rys. 4-4: Sieć rurociągów dla osiedla SHP [101].**

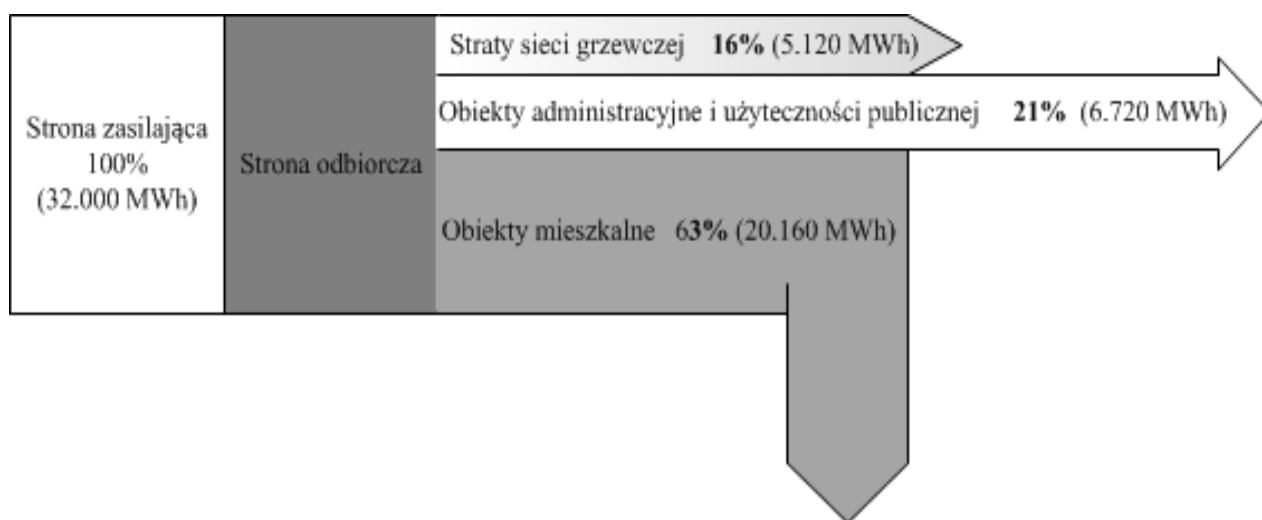
W roku 1993 nastąpiło przejście wykorzystywanego dotychczas przez bazę wojskową systemu sieci grzewczej osiedla SHP, w którym stosowano parę wodną jako czynnik grzewczy. Dokonano modernizacji sieci i przekształcono ją na system grzewczy wykorzystujący wodę jako nośnik ciepła, której łączna długość odcinków wynosi 13,5 km. Podstawowym parametrem wpływającym na pracę sieci jest temperatura otoczenia w oparciu o którą ustalana jest temperatura zasilania sieci, wahająca się na poziomie od 80 do 95°C. Temperatura zasilania sieci grzewczej regulowana jest przy wykorzystaniu zaworu trójdrożnego. Tego typu rozwiązanie pozwala na sterowanie pracą układu skojarzonego w zależności od aktualnej wartości zapotrzebowania na ciepło grzewcze. W stacji pompowej sieci grzewczej zainstalowano 3 pompy o mocy 18,5 kW, które umożliwiają wygenerowanie maksymalnego strumienia objętościowego wody na poziomie 460 m<sup>3</sup>/h. Strumień objętościowy czynnika grzewczego zależy od wartości różnicy ciśnienia pomiędzy zasilaniem a powrotem sieci. Wartość zadana różnicy ciśnienia pomiędzy zasilaniem a powrotem sieci, obliczana jest w zależności od aktualnej wartości strumienia objętościowego czynnika grzewczego. Tego typu rozwiązanie pozwala na znaczne oszczędności zużycia energii elektrycznej pomp cyrkulacyjnych w porównaniu do systemów bazujących na stałej wartości różnicy ciśnienia, gdyż w czasie niepełnego obciążenia możliwe jest obniżenie różnicy ciśnienia poniżej wartości nominalnej. Ciepło grzewcze dostarczane jest do poszczególnych odbiorców poprzez stacje odbioru ciepła, które przyłączone są do sieci grzewczej osiedla. Dane techniczne sieci grzewczej osiedla SHP zestawione są w tabeli 4-1.



Tabela 4-1: Dane techniczne sieci grzewczej osiedla SHP (2009).

<b>Rury</b>	Typ rur	Zwykła izolacja
	Średnica	DN 25- DN 300
	Długość	13,5 km
	Objętość	280 m <sup>3</sup>
	Ilość odbiorców	523
<b>Moc</b>	Roczna produkcja ciepła	32 000 MWh/a
	Moc maksymalna	16 MW
	Strumień masowy	12-127 kg/s
	Strumień objętościowy	43,5-460 m <sup>3</sup> /h
	Moc pomp sieci	3 x 18,5 kW
<b>Ciśnienie</b>	Różnica ciśnień	0,7 – 1,1 bar
	Stopień ciśnieniowy	5-6 bar (zasilanie)
		4-5 bar (powrót)
<b>Temperatura</b>	Temperatura zasilania	70-90 °C
	Temperatura powrotu	55-65 °C
	Średnia różnica temperatur	25 K

Dla potrzeb niniejszej pracy, stworzono bazę danych produkcji i zużycia energii cieplnej, a i częściowo elektrycznej, które były regularnie monitorowane podczas realizacji projektu POLYCITY (od 2005-2009 roku). Ogólny podział całkowitej energii cieplnej zasilającej osiedle na poszczególne grupy odbiorców tego osiedla dla roku 2009, widoczny jest na Rys. 4-5.



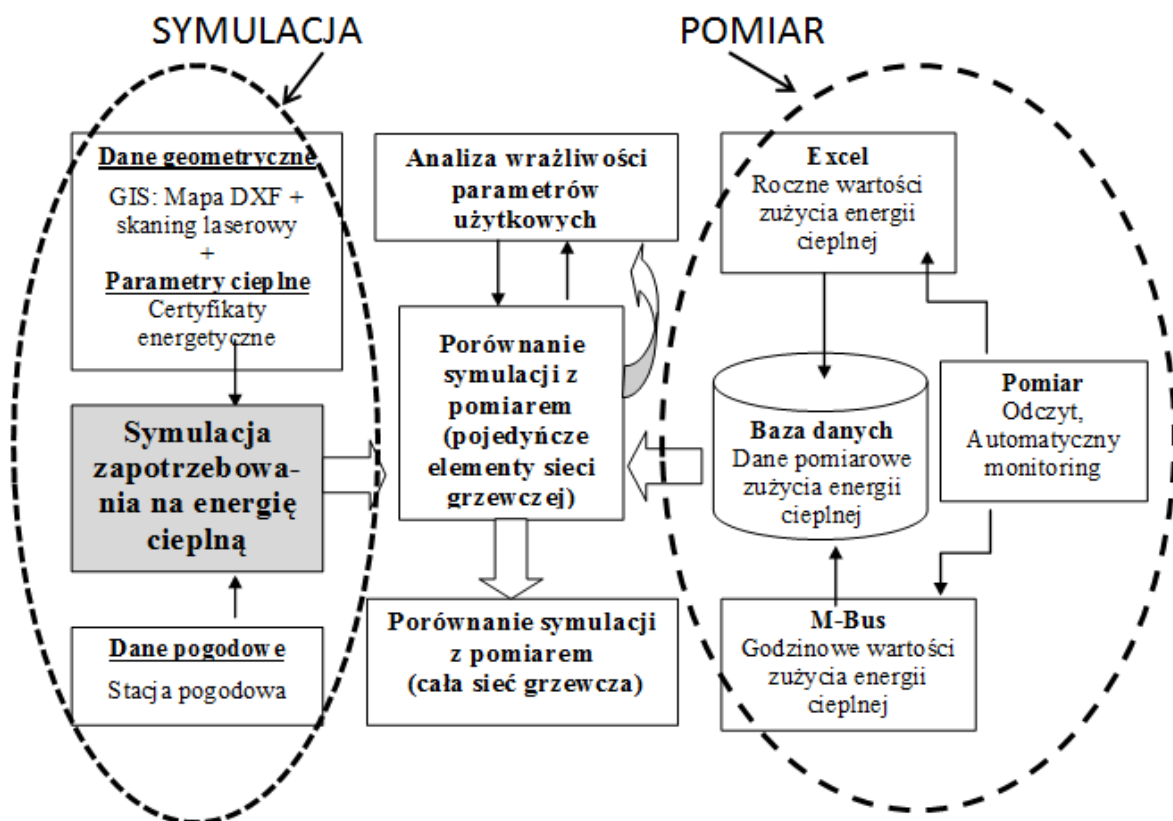
Rys. 4-5: Strona zasilająca a odbiorcza sieci grzewczej osiedla SHP (2009).

Jak wynika z Rys. 4-5, większość energii cieplnej wyprodukowanej w elektrociepłowni ORC (32000 MWh, dla roku 2009), dostarczana jest poprzez sieć grzewczą do obiektów mieszkalnych (63%). Względnie wysokie straty ciepła w sieci na poziomie 16% wynikają z faktu, iż część odcinków sieci nie posiada jeszcze przyłączenia do odbiorców. Aby zapobiec pękaniu rur w wyniku mrozu, konieczne było zapewnienie cyrkulacji czynnika grzewczego także w tych odcinkach sieci, do których nie zostali jeszcze przyłączeni odbiorcy energii cieplnej. Spowodowało to dodatkowe straty energii, które powinny jednak ulec redukcji w miarę przyłączania nowych odbiorców energii cieplnej. Dodatkowe straty sieci grzewczej spowodowane zostały suszeniem mokrych ścian nowo powstałych budynków. Fakt ten wpłynął na zwiększone zapotrzebowanie na ciepło grzewcze w pierwszych miesiącach eksploatacji tych obiektów. W fazie tej, obiekty te były jeszcze niezamieszkałe i całe ciepło grzewcze dostarczone do nich nie zostało rozliczane, ale wliczone w straty sieci grzewczej.

## 5 Opis modeli prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą

### 5.1 Ogólny opis modelowania zapotrzebowania na ciepło grzewcze

Wartość zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej osiedla zależy w głównej mierze od potrzeb zasilanych z niej odbiorców. Ilość energii, która w wyniku oszczędnego trybu korzystania z energii ciepłej poszczególnych odbiorców nie musi być wyprodukowana w elektrociepłowni, jest energią zaoszczędzoną. Dlatego ważnym aspektem wypracowanej w niniejszej pracy metodyki prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą jest możliwość uwzględnienia każdego z odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla z osobna. Na Rys. 5-1 przedstawiono schematyczny przebieg całego procesu prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą dla całej sieci grzewczej osiedla, a i pojedynczych odbiorców tej sieci.



Rys. 5-1: Schemat modelowania sieci grzewczej osiedla SHP.

W celu przeprowadzenia prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą poszczególnych odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla przy pomocy modeli symulacyjnych, w pierwszej kolejności przygotowano dane związane z charakterystyką energetyczną poszczególnych obiektów, jak ich parametry geometryczne i cieplne.



Z uwagi na fakt, że nie dla wszystkich obiektów SHP dostępne były dokładne dane geometryczne czy też parametry cieplne, wyszczególniono;

- obiekty, dla których dostępne są kompletne dane geometryczne, jak powierzchnia rzutu i ich wysokość,
- obiekty, dla których brak jest informacji, np. o ich wysokości (wysokość została założona jako 7,5 m dla obiektów o dwóch kondygnacjach).

Dla wszystkich obiektów wyznaczono parametry współczynników przenikania przegród U, jako uśrednione wartości tych parametrów z kilku obiektów referencyjnych, dla których dane te były dostępne w postaci certyfikatów energetycznych.

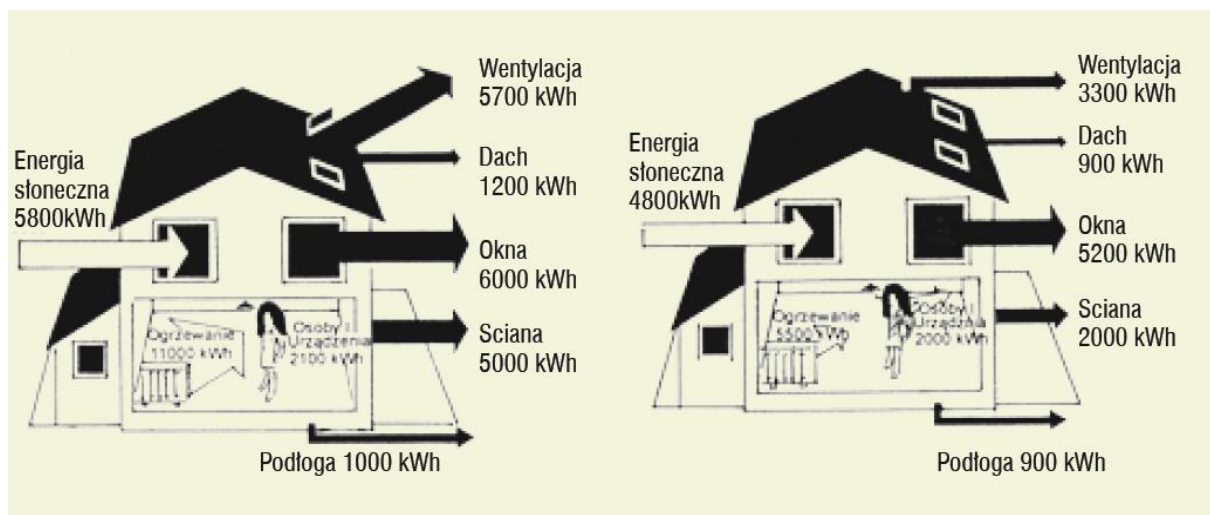
W modelach symulacyjnych zapotrzebowania na ciepło grzewcze, uwzględniono:

- zmieniające się warunki klimatyczne (zmiennosc temperatury zewnętrznej i natężenia promieniowania słonecznego); dane pomiarowe ze stacji pogodowej zainstalowanej na dachu elektrociepłowni ORC analizowanego osiedla,
- strukturę potrzeb cieplnych odbiorców przyłączonych do sieci grzewczej osiedla SHP.

Wyżej wymienione dane wejściowe wprowadzone są do modeli symulacyjnych, które umożliwiają przeprowadzenie komputerowej symulacji zapotrzebowania na energię cieplną. Prognoza zapotrzebowania na energię cieplną odbywa się w dwóch etapach. W pierwszej kolejności dokonuje się symulacji dla poszczególnych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, a następnie wyniki te zsumowane są dla całej sieci grzewczej osiedla. Do weryfikacji obliczonych wartości zapotrzebowania na energię cieplną wykorzystuje się dane z monitoringu o różnym stopniu szczegółowości.

## **5.2 Opis modeli matematycznych do prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną**

W celu utrzymania temperatury wewnętrznej w rozpatrywanych obiektach na założonym poziomie, nadwyżka strat ciepła nad jego zyskami musi zostać zrekompensowana ciepłem dostarczanym przez instalację ogrzewania. Bilans cieplny analizowanych obiektów uwzględnia straty ciepła związane z przenikaniem przez przegrody zewnętrzne i ich wentylacją, jak i zyski ciepła od docierającego do obiektu promieniowania słonecznego oraz wewnętrzne od użytkowników i wyposażenia tych obiektów. Schemat strat ciepła w budynku pokazany został na Rys. 5-2.



Rys. 5-2: Przykładowy rozkład strat i zysków energii w domu o średnim i niskim zapotrzebowaniu na energię cieplną [103].

Udziały wyżej wymienionych składników w bilansie cieplnym ogrzewanego obiektu zależą od:

- izolacyjności cieplnej obudowy obiektów,
- wielkości i kształtu danego obiektu,
- lokalizacji i usytuowania obiektów względem kierunków geograficznych,
- ilości i rozmieszczenia części przezroczystych w przegrodach zewnętrznych rozpatrywanych obiektów,
- przepuszczalności promieniowania słonecznego części przezroczystych obudowy obiektów,
- intensywności i sposobu wentylacji rozpatrywanych obiektów,
- sposobu użytkowania obiektów, [70].

W celu odzwierciedlenia procesu wymiany ciepła pomiędzy ogrzewanymi obiektami analizowanego osiedla a środowiskiem zewnętrznym, posłużono się trzema modelami matematycznymi o różnym poziomie dokładności, które zaimplementowano w środowisku symulacyjnym INSEL [42].

Jak już wcześniej wspomniano, proces pozyskiwania dokładnych danych dotyczących charakterystyki energetycznej, w przypadku modelowania na dużą skalę, jest procesem bardzo żmudnym. Dla przypomnienia, dotychczasowe modele są w stanie dokładnie obliczyć zapotrzebowanie na energię cieplną dla pojedynczych odbiorców sieci grzewczych osiedli tylko w przypadku, gdy dostępne są dokładne dane wejściowe dotyczące parametrów energetycznych. Większość dotychczasowych modeli prognozuje zapotrzebowanie na energię cieplną wykorzystując metodę opartą na typizacji obiektów, gdzie prognoza dotyczy większych obszarów, a nie rozpatruje każdego obiektu z osobna. Dlatego jednym z głównych wyzwań niniejszej pracy jest wypracowanie metodyki, która przy udziale minimalnej ilości danych wejściowych, pozwoli odzwierciedlić rzeczywiste zużycie energii cieplnej. W ramach realizacji tego celu, przetestowano trzy modele o różnym poziomie dokładności, opisanych w kolejnych punktach niniejszej pracy.

### 5.2.1 Model 1 – przenikanie ciepła przez przegrody zewnętrzne

Modelowanie zapotrzebowania na energię cieplną sieci grzewczej osiedla SHP, rozpoczęto od przetestowania najprostszej metody z możliwych (tzw. model 1), uwzględniającej jedynie straty ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne obiektu. Założono bowiem, iż straty wentylacyjne zrekompensowane są poprzez zyski ciepła od źródeł wewnętrznych i od promieniowania słonecznego. Straty ciepła poprzez przegrody zewnętrzne obiektu były bardzo długo uznawane za jedyną miarę jakości energetycznej budynku, Ulbrich [104].

Transport ciepła poprzez przegrody zewnętrzne obiektu składa się z następujących etapów:

- przepływu ciepła od powietrza wewnątrz budynku do powierzchni wewnętrznej strony przegrody zewnętrznej,
- przepływu ciepła drogą przewodzenia ciepła wewnątrz przegrody zewnętrznej,
- przepływu ciepła od powierzchni zewnętrznej strony przegrody zewnętrznej do powietrza na zewnątrz budynku. Łączny proces transportu ciepła od płynu do płynu nosi nazwę przenikania ciepła.

Model 1 wymaga jedynie kilku danych wejściowych, a zapotrzebowanie na energię cieplną dla każdego z odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, obliczone jest jako iloczyn powierzchni przegród zewnętrznych obiektu, wartości współczynnika przenikania przegród  $U$  i różnicy temperatur pomiędzy ogrzewanym obiektem a środowiskiem zewnętrznym, jak wynika ze wzoru:

$$Q_h = A_c U_c \Delta T \quad (5-1)$$

Gdzie:

$Q_h$  - Zapotrzebowanie na ciepło grzewcze [W]

$A_c$  - Całkowita powierzchnia przegród zewnętrznych obiektu [m<sup>2</sup>]

$U_c$  - Współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych obiektu [W/m<sup>2</sup>K]

$\Delta T$  - Różnica temperatur pomiędzy zewnątrz a wewnątrz [K]

W powyższym równaniu nie uwzględnia się mostków cieplnych z uwagi na prostą strukturę modelu.

Całkowite straty ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne obiektu określane są jako suma strat ciepła przez ściany zewnętrzne, okna, podłogę i stropodach:

$$Q_h = [(A_i U_i) + (A_{ok} U_{ok}) + (A_p U_p) + (A_{sd} U_{sd})] \Delta T \quad (5-2)$$

Gdzie:

$A_i$  - Całkowita powierzchnia i-tej przegrody zewnętrznej [m<sup>2</sup>]

$U_i$  - Współczynnik przenikania ciepła i-tej przegrody zewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

$A_{ok}$  – Powierzchnia okien [m<sup>2</sup>]

$U_{ok}$  - Współczynnik przenikania ciepła okien [W/m<sup>2</sup>K]

$A_p$  – Powierzchnia podłogi [m<sup>2</sup>]

$U_p$  - Współczynnik przenikania ciepła podłogi [W/m<sup>2</sup>K]

$A_{sd}$  – Powierzchnia stropodachu [m<sup>2</sup>]

$U_{sd}$  - Współczynnik przenikania ciepła stropodachu [W/m<sup>2</sup>K]

Różnica temperatur  $\Delta T$  [K] z kolei, określa różnicę pomiędzy stałą temperaturą wewnętrzną a zmienną temperaturą zewnętrzną, jak wynika ze wzoru:

$$\Delta T = T_{wewn} - T_{zewn} \quad (5-3)$$

Gdzie:

$T_{wewn}$  – temperatura wewnętrzna [°C]

$T_{zewn}$  – temperatura zewnętrzna [°C]

Znaczącym problemem współczesnych czasów jest sposób dynamicznego ogrzewania pomieszczeń, przy którym należy brać pod uwagę także stany nieustalone przepływu ciepła. Nieustalony przepływ ciepła w przypadku przegród zewnętrznych objawia się akumulacyjnością lub opóźnionym oddawaniem ciepła z dużej masy tych przegród, a jego opis matematyczny jest dosyć skomplikowany. Tylko w przypadku starych domów, charakteryzujących się grubymi monolitycznymi przegrodami zewnętrznymi, gdzie duże zmiany temperatury na zewnątrz nie wpływają istotnie na mikroklimat wnętrza obiektu, branie pod uwagę nieustalonego przepływu ciepła ma większy sens. W obiektach budowlanych w nowych technologiach, ze ścian wielowarstwowych, na ogół lekkiej konstrukcji (mamy z nimi do czynienia w niniejszej pracy), które bardzo szybko „reagują” na zmiany temperatury zewnętrznej, stany nieustalone mogą zostać pominięte, Ulbrich [104].

Jak już wspomniano wcześniej, zaletą modelu 1 jest brak konieczności wprowadzenia do niego zbyt wielu danych wejściowych, co w przypadku prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną na dużą skalę (sieci grzewcze osiedli, miast) jest korzystne. Prosta struktura modelu uniemożliwia jednak szerszą analizę wpływu parametrów użytkowych na wartość zapotrzebowania na energię cieplną. W tym celu wykorzystuje się dodatkowy model, opisany poniżej, uwzględniający cały bilans energetyczny badanego obiektu.

### 5.2.2 Model 2 –całkowity bilans energetyczny badanego obiektu

W celu dokładniejszego, niż w przypadku modelu 1, określenia wielkości zapotrzebowania na energię cieplną na ogrzewanie, konieczna była analiza całkowitego bilansu cieplnego obiektu mieszkalnego. Bilans taki uwzględnia nie tylko straty, ale i zyski ciepła powstające w ogrzewanym obiekcie. W tym celu stworzono model matematyczny, tzw. model 2, oparty o Normę Europejską DIN V 18599 [18]. Model 2 uwzględnia pełny bilans energetyczny rozpatrywanych obiektów osiedla SHP; straty ciepła przez przenikanie i na

wentylację, oraz wewnętrzne zyski ciepła i zyski ciepła od promieniowania słonecznego (tok obliczeniowy w załączniku, 10). W modelu 2, tak jak to miało miejsce w przypadku modelu 1, ze względu na budownictwo o konstrukcji lekkiej, pomija się stany nieustalone.

Aby umożliwić wykorzystanie modelu 2 dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla, przyjmuje się kilka dalszych uproszczeń, opisanych poniżej. Współczynnik przenikania ciepła przegród  $U$  jest zależny od rodzaju i grubości materiału, z którego wykonana jest dana przegroda oraz od jej charakteru:

$$U = f(\lambda, \delta, \alpha_{c,j}, \alpha_{c,i}) \quad (5-4)$$

Gdzie:

$U$  – współczynnik przenikania ciepła przegrody zewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

$\lambda$ - współczynnik przewodzenia ciepła materiału przegrody zewnętrznej [W/mK]

$\delta$  - grubość przegrody zewnętrznej [m]

$\alpha_{c,j}$ - współczynnik przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_{c,i}$ - współczynnik przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

W celu obliczenia mostków cieplnych stosuje się uproszczoną metodę uwzględnienia wpływu liniowych mostków cieplnych na wielkość strat ciepła, polegającą na zastosowaniu dodatków do współczynników przenikania ciepła przegród  $U$ , Kasperkiewicz [49], wg wzoru:

$$U_{ck} = U_c + \Delta U_{tb} \quad (5-5)$$

Gdzie:

$U_{ck}$  – skorygowany współczynnik przenikania ciepła przegrody zewnętrznej z uwzględnieniem mostków cieplnych [W/m<sup>2</sup>K]

$U_c$  - współczynnik przenikania ciepła przegrody zewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

$\Delta U_{tb}$  - współczynnik korekcyjny dla mostków cieplnych [W/m<sup>2</sup>K]

Dla obiektów nowych, do których zaliczają się obiekty osiedla SHP, przyjmuje się wg normy europejskiej DIN 4108-6 [19] współczynnik korekcyjny dla mostków cieplnych równy 0,05 W/m<sup>2</sup>K.

Ściany posiadające różne materiały dzieli się na warstwy, a współczynnik oporu cieplnego obliczany jest jako suma oporu cieplnego dla każdej warstwy. W modelu 2 rezygnuje się z podziału ścian na warstwy z uwagi na niedostępność tak szczegółowych danych dla wszystkich obiektów analizowanego osiedla.

Opory przejmowania ciepła na powierzchniach przegród budowlanych przyjmowane są w zależności od kierunku przepływu strumienia cieplnego (tabela 5-1).

**Tabela 5-1: Opory przejmowania ciepła na powierzchniach przegród, (m<sup>2</sup>K)/W [71].**

Opory przejmowania ciepła, (m <sup>2</sup> K)/W	kierunek przepływu strumienia cieplnego		
	w górę	poziomy	w dół
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Współczynnik przenikania ciepła przegród  $U$  oblicza się, uwzględniając współczynnik oporu cieplnego przegrody oraz poprawki na nieszczelności izolacji i mostki termiczne, wg wzoru:

$$U = \frac{1}{R_T}. \quad (5-6)$$

Model 2, w porównaniu do modelu 1, pozwala na analizę wpływu dodatkowych parametrów użytkowych, takich jak: krotność wymian powietrza, wewnętrzne zyski ciepła oraz przerwa nocna w ogrzewaniu, na zużycie/zapotrzebowanie na ciepło grzewcze. Zależności te opisane są równaniami matematycznymi znajdującymi się w załączniku, 10.

### 5.2.3 Model 3 –model dynamiczny

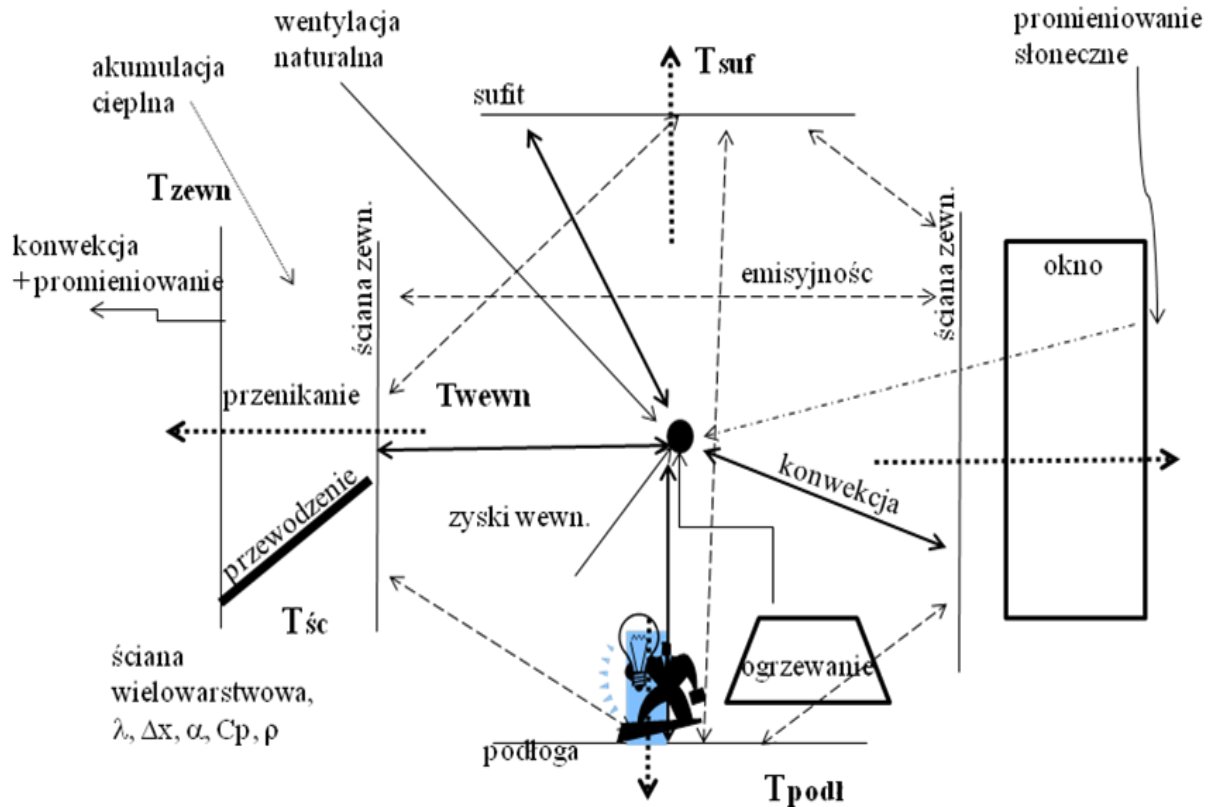
Charakterystyka materiału budowlanego nie powinna ograniczać się tylko do operowania współczynnikiem przenikania ciepła przegród  $U$ , tak jak to było dokonane w przypadku modelu 1 i 2, gdyż dynamika zmian temperatury zewnętrznej w warunkach rzeczywistych powoduje, że przyjęcie tego współczynnika dla materiałów budowlanych, jako jedyne go wskaźnika do analizy energetycznej badanego obiektu, nie znajduje pełnego uzasadnienia, Springer [87]. Akumulacyjność cieplna przegród zewnętrznych (pojemność cieplna  $Q$ ) jest szczególnie istotna, gdyż ma ona duży wpływ na dynamiczny charakter modelowania, Janowicz [45]. W modelu 2, opisanym powyżej, akumulacyjność cieplna w przegrodach zewnętrznych analizowanych obiektów została uwzględniona jedynie poprzez przyjęcie współczynnika określającego stosunek zysków do strat ciepła. W zależności od właściwości kumulacyjnych masy obiektu, stosunek ten jest zmienny, co przyczynia się to do sporych odchyłek pomiędzy wartościami obliczonymi a zmierzonymi zapotrzebowania/zużycia energii cieplnej. W celu zredukowania tych odchyłek konieczne było wprowadzenie dodatkowego modelu, który nazwano modelem dynamicznym (model 3).

Zyski cieplne, jak i również zależny w czasie bilans energii analizowanego obiektu muszą zostać obliczone przy uwzględnieniu dynamicznych zmian cieplnych zachodzących w masie obiektu. Ten skomplikowany problem uwzględnia zazwyczaj:

- analizę wymiany i magazynowania ciepła w poszczególnych przegrodach zewnętrznych analizowanego obiektu, jak ściany, podłoga, sufit,
- analizę całego obiektu, która bierze pod uwagę reakcje pomiędzy masą obiektu i temperaturą powietrza poprzez konwekcję i promieniowanie oraz zyski od

krótkofalowego promieniowania słonecznego oraz od urządzenia ogrzewczego i wentylacji.

Rys. 5-3 schematycznie przedstawia wymianę ciepła pomiędzy poszczególnymi przegrodami analizowanego obiektu.

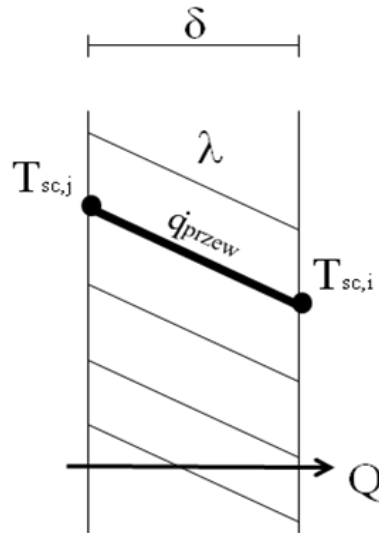


Rys. 5-3: Schemat wymiany ciepła dla modelu dynamicznego [opracowanie własne].

Model dynamiczny składa się z kilku bloków (patrz rozdział 5.3), które umożliwiają obliczenie poszczególnych procesów dynamicznego charakteru wymiany ciepła, opisanych poniżej przy użyciu równań matematycznych.

### Przewodzenie ciepła

Przewodzenie ciepła jest obok konwekcji i promieniowania jednym z trzech podstawowych zjawisk wymiany ciepła i zachodzi w obrębie przegrody płaskiej, w której istnieje różnica temperatur. Proces ten polega na rozprzestrzenianiu się energii cieplnej wewnątrz przegrody na drodze wymian energii cieplnej bezpośrednio pomiędzy sąsiednimi cząstkami oraz dyfuzji drobin, atomów i swobodnych elektronów. Schemat przewodzenia ciepła przez przegrodę pokazany jest na Rys. 5-4:



Rys. 5-4: Schemat przewodzenia ciepła przez przegrodę płaską [opracowanie własne].

Przewodzenie ciepła jest opisane poprzez tzw. prawo Fouriera, które wyrażone jest poprzez tzw. współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Współczynnik ten wskazuje, ile ciepła przepływa przez jednostkę przekroju w ciągu jednostki czasu, przy spadku temperatury równym jedności, na drodze jednostki grubości warstwy.

$$q_{przew} = \frac{\lambda}{\delta} (T_{sc,j} - T_{sc,i}) \quad (5-7)$$

Gdzie:

$q_{przew}$  – gęstość strumienia ciepła przez przewodzenie [W/m<sup>2</sup>]

$T_{sc,j}$  – temperatura j-tej przegrody po stronie wewnętrznej [K]

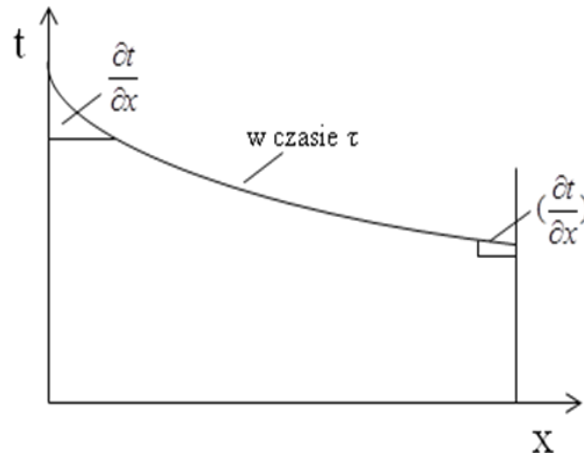
$T_{sc,i}$  – temperatura i-tej przegrody po stronie zewnętrznej [K]

W przypadku ustalonego przepływu ciepła, temperatura w każdym punkcie rozpatrywanej przegrody jest niezmienna w czasie; pole temperatur jest funkcją jedynie położenia punktu. Zależność opisująca przyrost temperatury odniesiony do przesunięcia punktu wzdłuż normalnej nazywamy gradientem temperatury:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = gradt \quad (5-8)$$

W przypadku nieustalonego przewodzenia ciepła natomiast, pole temperatur jest nie tylko funkcją położenia punktu, ale i czasu, gdzie przepływ ciepła jest zmienny w czasie, jak zobrazowano na rysunku poniżej:





Rys. 5-5: Rozkład temperatury w przewodzeniu niustalonym [41].

Punktem wyjścia dla rozważań nad przewodzeniem niustalonym jest równanie różniczkowe Fouriera, określające, jak zmienia się temperatura w czasie w zależności od zmiany gradientu temperatury w przestrzeni (w tym wypadku wzdłuż osi  $x$ ) przy jednokierunkowym przepływie ciepła. Zależność tę można wyrazić następującym wzorem:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (5-9)$$

gdzie  $a$  jest współczynnikiem przewodzenia temperatury charakterystycznym dla danej przegrody:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho} \quad (5-10)$$

Gdzie:

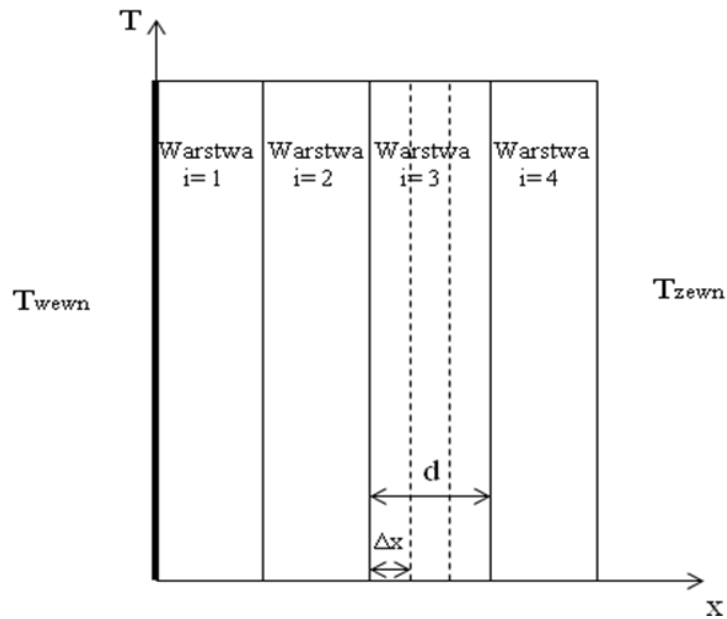
$C_p$  – ciepło właściwe materiału przegrody [J/kgK]

$\rho$  – gęstość materiału przegrody [kg/m<sup>3</sup>]

Powyższe równanie różniczkowe (5-9) można zastąpić równaniem przybliżonym, operując skończonymi przyrostami:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2} \quad (5-11)$$

W celu obliczenia niustalonego przepływu ciepła w modelu 3 wykorzystuje się tzw. metodę różnic skończonych, opisaną w Glueck [37]. W tym celu dzieli się przegrodę obiektu na warstwy  $i$  o grubości  $d$ , jak pokazano na rysunku poniżej:



Rys. 5-6: Podział przegrody na warstwy [opracowanie własne].

W modelu 3, każda z tych warstw dzielona jest w sposób zautomatyzowany na odpowiednią ilość podwarstw o grubości \$\Delta x\$. Celem jest zapewnienie odpowiedniego kroku przestrzennego gwarantującego zachowanie kryterium stabilności, wyrażonego następującym równaniem:

$$\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \leq 0,5 \quad (5-12)$$

Przyjmując za:

$$\Delta x = \frac{d}{n_{podz}} \quad (5-13)$$

Gdzie:

\$d\$ – grubość warstwy w przegrodzie [m]

\$n\_{podz}\$ – ilość podziału warstwy

można zapisać:

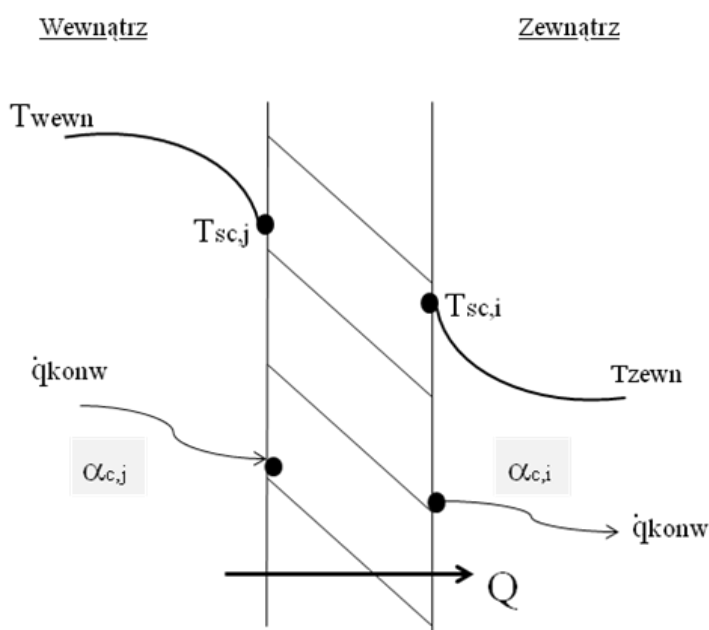
$$\frac{a\Delta\tau}{\left(\frac{d}{n_{podz}}\right)^2} \leq 0,5 \quad (5-14)$$

W momencie, gdy np. współczynnik przewodzenia temperatury  $a$  jest zbyt mały, ilość podwarstw zostaje odpowiednio zwiększona. W modelu 3, odbywa się to w sposób zautomatyzowany, a krok czasowy dla wszystkich podwarstw jest stały.

### Wnikanie ciepła

Wymiana ciepła poprzez wnikanie odbywa się pomiędzy poruszającym się ośrodkiem ciekłym lub gazowym (w tym przypadku powietrzem wewnętrznym obiektu) i wewnętrzną powierzchnią przegrody danego obiektu (tzw. konwekcja). Ruch ciepła w tym przypadku odbywa się w ten sposób, że cząsteczki ulegają przemieszczaniu ku powierzchni wewnętrznej danej przegrody obiektu, stykają się z nią i oddają jej ciepło.

Konwekcja zachodzi również po zewnętrznej stronie przegrody danego obiektu, gdzie ciepło przejmowane jest przez powietrze zewnętrzne od powierzchni tej przegrody, jak zilustrowano schematycznie na Rys. 5-7:



Rys. 5-7: Schemat przjmowania ciepła [opracowanie własne].

Zjawisko konwekcyjnego wnikania ciepła zachodzącego wewnątrz obiektu, czyli wnikanie ciepła od powietrza wewnątrz obiektu do powierzchni przegrody po jej wewnętrznej stronie, opisane jest następującym równaniem [53]:

$$q_{konw} = \alpha_{c,j} (T_{wewn} - T_{sc,j}) \quad (5-15)$$

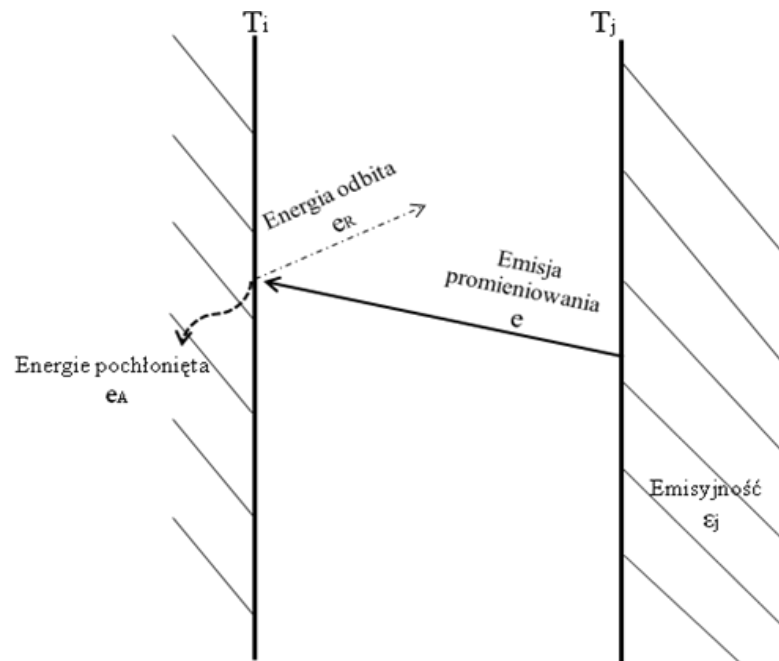
Gdzie:

$q_{konw}$  – gęstość strumienia ciepła na drodze konwekcji [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_{c,j}$  – konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła po wewnętrznej stronie przegrody [W/m<sup>2</sup>K]

## Blok obliczeniowy dla promieniowania (radiacji)

Wymiana ciepła poprzez promieniowanie (radiację) w odróżnieniu od przewodzenia i konwekcji nie wymaga istnienia środka materialnego, w którym mogłoby się rozchodzić (może występować w próżni). Promieniowanie zachodzi wówczas, gdy mamy do czynienia z przepływem energii za pomocą promieniowania elektromagnetycznego (światelnego lub podczerwonego), a jej ilość zależy od rodzaju powierzchni przegrody zewnętrznej i od jej temperatury (patrz rysunek poniżej).



Rys. 5-8: Schemat promieniowania ciepłego [opracowanie własne].

Jak zobrazowano powyżej, energia promieniowania padającego na jakieś ciało zostaje po części pochłonięta, a jej pozostała część zostaje odbita, co wyrażone jest następującym wzorem:

$$e = e_A + e_R \quad (5-16)$$

Gdzie:

$e$  – emisja promieniowania

$e_A$  – energia pochłonięta

$e_R$  – energia odbita

Emisyjność, określana jako  $\varepsilon$ , to stosunek gęstości emisji własnej danego ciała do gęstości emisji własnej ciała czarnego przy tej samej temperaturze, jak wynika z poniższego wzoru:

$$\varepsilon = \left( \frac{e}{e_c} \right)_T \quad (5-17)$$

Emisja ciała czarnego wyrażona jest prawem Stefana-Boltzmana [50]:

$$e_c = \sigma_c T^4 \quad (5-18)$$

Gdzie:

$e_c$  - emisja ciała czarnego [W/m<sup>2</sup>]

$\sigma_c$  – stała Stefana-Boltzmana =  $5,67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$

Rzeczywiste ciała nie są ciałami doskonale czarnymi i dla nich prawo Stefana-Boltzmana, tj. emisyjność promieniowania źródła ma postać:

$$e_{sc,j} = \varepsilon_{sc,j} \sigma_c T_{sc,j}^4 \quad (5-19)$$

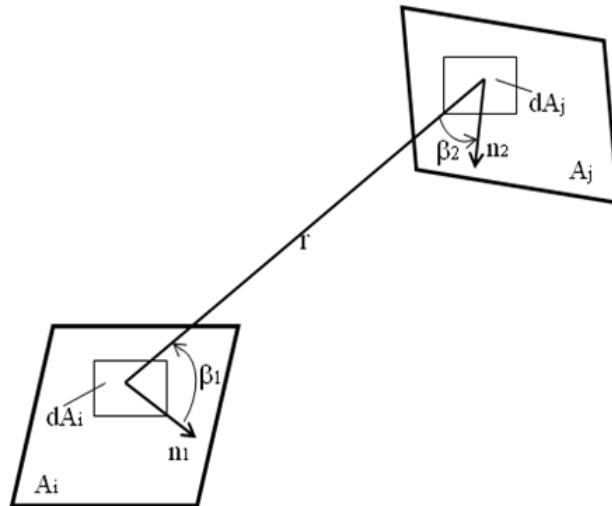
Gdzie:

$\varepsilon$  – emisyjność powierzchni (przyjmuje wartości od 0-1; 1-dla ciała doskonale czarnego)

Powyższe równanie pozwala wyliczyć całkowity strumień promieniowania wychodzącego ze źródła we wszystkich kierunkach.

#### *Promieniowanie pomiędzy powierzchniami wewnętrznymi*

W przypadku, gdy wymiana ciepła na drodze promieniowania (radiacji) odbywa się pomiędzy dwiema powierzchniami  $dA_{sc,i}$  i  $dA_{sc,j}$  potrzebne jest wyznaczenie tzw. współczynnika konfiguracji określającego, jaka część emisji powierzchni i-tej trafia do powierzchni j-tej. Współczynnik ten, zwany również współczynnikiem kątowym, zależy nie tylko od kątów padania promieniowania, ale też od oddalenia, wielkości i kształtu powierzchni promieniujących, jak pokazuje poniższy rysunek.



Rys. 5-9: Schemat dwóch płaszczyzn oddalonych od siebie i ustawionych prostopadle, o przecinających się normalnych poprowadzonych z geometrycznych środków [84].

Wartość średniego współczynnika konfiguracji obliczana jest wg następującego wzoru:

$$\varphi_{sc,i-sc,j} = \frac{1}{\pi A_{sc}} \int_{A_{sc,i}} \int_{A_{sc,j}} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_{sc,i} dA_{sc,j} \quad (5-20)$$

Gdzie:

$A_{sc,i}$  – powierzchnia i-tej płaszczyzny [m<sup>2</sup>]

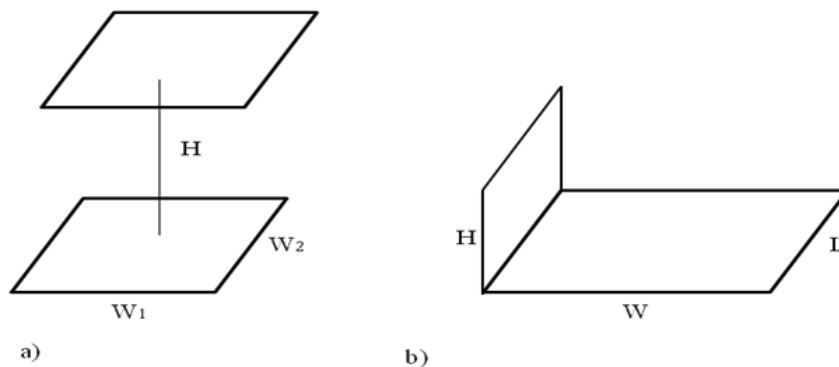
$A_{sc,j}$  – powierzchnia j-tej płaszczyzny [m<sup>2</sup>]

$\beta_1$  – kąt nachylenia i-tej płaszczyzny [°]

$\beta_2$  – kąt nachylenia j-tej płaszczyzny [°]

$r$  – odległość pomiędzy płaszczyznami [m]

Analizując dwie płaszczyzny wymieniające ciepło na drodze radiacji, możliwe jest przy wykorzystaniu prostych analitycznych równań, aby wyznaczyć współczynniki konfiguracji w zależności od ich usytuowania względem siebie:



Rys. 5-10: Podstawowe współczynniki konfiguracji: a) płaszczyzny równoległe, b) płaszczyzny prostopadle [2].

Współczynnik konfiguracji dla dwóch równolegle ustawionych względem siebie płaszczyzn o wielkości  $W_1 \cdot W_2$ , oddzielonych od siebie o odległość  $H$ , gdzie  $x=W_1/H$  i  $y=W_2/H$ , oblicza się według następującego wzoru:

$$\varphi_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi xy} \left[ \ln \frac{x_1^2 y_1^2}{x_1^2 + y_1^2 - 1} + 2x \left( y_1 \arctan \frac{x}{y_1} - \arctan x \right) + 2y \left( x_1 \arctan \frac{y}{x_1} - \arctan y \right) \right]$$

gdzie :

$$x_1 \equiv \sqrt{1 + x^2} \text{ and}$$

$$y_1 \equiv \sqrt{1 + y^2}$$

$$\varphi_{j \rightarrow i} = \varphi_{i \rightarrow j}$$

(5-21)

a dla płaszczyzn ustawionych względem siebie prostopadle, z płaszczyzną poziomą o wielkości  $W \cdot L$  i płaszczyzną pionową o wielkości  $H \cdot L$ , gdzie  $h=H/L$  i  $w=W/L$ :

$$\varphi_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi w} \left[ h \arctan \left( \frac{1}{h} \right) + w \arctan \left( \frac{1}{w} \right) - \sqrt{h^2 + w^2} \arctan \left( \frac{1}{\sqrt{h^2 + w^2}} \right) + \frac{1}{4} \ln (ab^{w^2} c^{h^2}) \right]$$

gdzie :

$$a = \frac{(1 + h^2)(1 + w^2)}{1 + h^2 + w^2}, b = \frac{w^2(1 + h^2 + w^2)}{(1 + w^2)(h^2 + w^2)}, c = \frac{h^2(1 + h^2 + w^2)}{(1 + h^2)(h^2 + w^2)}$$

$$\varphi_{j \rightarrow i} = \frac{A_i}{A_j} \varphi_{i \rightarrow j}$$

(5-22)

Tak wyznaczone współczynniki kątowe dla wszystkich przegród wymieniających pomiędzy sobą ciepło na drodze radiacji, służą do obliczenia całkowitego strumienia ciepła wymienianego poprzez radiację:

$$q_{r;sc,i} = e_{sc,i} - \varepsilon_{sc,i} \sum_{j=1}^{i \max} \varphi_{sc,i;sc,j} \dot{f}_{sr} \quad (5-23)$$

gdzie  $\dot{f}_{sr}$  to średnia wartość jasności opromieniowania równa stosunkowi emisyjności własnej danej powierzchni  $j$  do jej absorpcyjności:

$$\dot{f}_{sr} \approx \frac{\sum_{j=1}^N \varepsilon_{sc,j} \sigma T_{sc,j}^4 A_{sc,j}}{\sum_{j=1}^N \varepsilon_{sc,j} A_{sc,j}} = \frac{\sum_{j=1}^N e_{sc,j} A_{sc,j}}{\sum_{j=1}^N \varepsilon_{sc,j} A_{sc,j}} \quad (5-24)$$

Wzór (5-23) jest wykorzystany do obliczenia strumienia promieniowania netto dla każdej z powierzchni promieniujących:

$$q_{r;sc,j} = \underbrace{\varepsilon_{sc,j} \sigma T_{sc,j}^4}_{\substack{\text{emisyjność} \\ \text{własna} \\ \text{powierzchni } j}} - \underbrace{\varepsilon_{sc,j}}_{\substack{\text{absorbcyjność} \\ \text{powierzchni } j}} \sum_{i=1}^N \varphi_{sc,i;sc,j} \left( \underbrace{\varepsilon_{sc,i} \sigma T_{sc,i}^4}_{\substack{\text{emisyjność} \\ \text{własna} \\ \text{powierzchni } i}} + \underbrace{(1 - \varepsilon_{sc,i}) \dot{f}_{sr}}_{\substack{\text{średnia} \\ \text{intensywność} \\ \text{odbijania}}} \right) \quad (5-25)$$

gdzie emisyjność własna od każdej z tych powierzchni jest zredukowana poprzez absorpcję promieniowania długofalowego z wszystkich pozostałych powierzchni.

#### Wymiana ciepła pomiędzy powierzchniami zewnętrznymi przegród obiektu

Wymiana ciepła na drodze radiacji po zewnętrznej stronie obiektu odbywa się pomiędzy zewnętrzną powierzchnią przegród tego obiektu a powierzchnią gruntu, niebem i powietrzem zewnętrznym i jeśli dostępne, obiektami sąsiadującymi, jak wynika ze wzoru zamieszczonego w Walton [106] and McClellan and Pedersen [58]:

$$q_{r,sc,zewn} = \varepsilon_{sc,j,zewn} \sigma_c \varphi_{gr} (T_{gr}^4 - T_{sc,j,zewn}^4) + \varepsilon_{sc,j,zewn} \sigma_c \varphi_{niebo} (T_{niebo}^4 - T_{sc,j,zewn}^4) + \varepsilon_{sc,j,zewn} \sigma_c \varphi_{zewn} (T_{zewn}^4 - T_{sc,j,zewn}^4) \quad (5-26)$$

Gdzie:

$\varepsilon_{sc,j,zewn}$  – emisyjność zewnętrznej powierzchni przegrody

$\varphi_{gr}$  – współczynnik konfiguracji dla gruntu

$\varphi_{niebo}$  – współczynnik konfiguracji dla nieba

$\varphi_{zewn}$  – współczynnik konfiguracji dla powietrza zewnętrznego

$T_{niebo}$  – temperatura nieba [K]

$T_{gr}$  – temperature gruntu [K]



W modelu 3 wymiana ciepła poprzez radiację pomiędzy zewnętrzną stroną przegrody obiektu a środowiskiem zewnętrznym została ograniczona jedynie do wymiany ciepła z niebem:

$$q_{r,zewn} = \varepsilon_{sc,j,zewn} \sigma_c (T_{niebo}^4 - T_{sc,j,zewn}^4) \rho_{niebo} \quad (5-27)$$

Wartość współczynnika konfiguracji dla nieba została przyjęta jako 0,5, przy założeniu, iż wszystkie przegrody zewnętrzne obiektu „widzą” jedynie 50% nieba.

#### *Liniowa postać równania*

W celu uwzględnienia wymiany ciepła poprzez radiację w bilansie energii wykorzystanym do obliczenia temperatur poszczególnych przegród danego obiektu (patrz dalsza część opisu), potrzebna będzie liniowa postać równania na obliczenie strumienia ciepła poprzez radiację. Równanie to zostało utworzone po wprowadzeniu radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła  $\alpha_{r,i}$ , jak widać poniżej:

$$q_{prom} = \alpha_{r,i} (T_{sc,i} - T_{sc,j}) \quad (5-28)$$

Gdzie:

$q_{prom}$  – gęstość strumienia ciepła przez promieniowanie (radiację) [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_{r,i}$  – radiacyjny współczynnik wnikania ciepła po wewnętrznej stronie przegrody [W/m<sup>2</sup>K]

Jak wynika z równania powyżej, strumień ciepła poprzez radiację wyrażony jest w odniesieniu do powierzchni absorbującej promieniowanie. Jest to przeciwne do zwyczajnej procedury, która traktuje wymianę ciepła poprzez radiację jako funkcję powierzchni emitującej.

#### **Blok obliczeniowy dla rozkładu promieniowania słonecznego**

Wartości zaabsorbowanego promieniowania słonecznego poprzez poszczególne przegrody zewnętrzne danego obiektu są zależne od materiału, z którego dana przegroda jest wykonana. Strumień energii słonecznej zaabsorbowany przez poszczególne powierzchnie przegród  $i$  obliczany jest wg wzoru:

$$q_{sl} = S_i \frac{A_{sc,i} a_{sc,i}}{\sum_{i=1}^N A_{sc,i}} \quad (5-29)$$

Gdzie:

$S_i$  - całkowite promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię  $i$ -tej przegrody [Wh/m<sup>2</sup>]

$a_{sc,i}$  – współczynnik absorpcyjny dla  $i$ -tej powierzchni przegrody

$A_{sc,i}$  – powierzchnia  $i$ -tej przegrody [m<sup>2</sup>]

Zazwyczaj przyjmuje się dla przegród współczynnik absorpcyjny równy  $a=0,7$ , a dla powierzchni bardzo ciemnych  $a=0,9$ .

### Blok obliczeniowy dla przegrody zewnętrznej obiektu

Obiekt składa się z przegród zewnętrznych (ściana, podłoga, sufit), powietrza wewnątrz pomieszczenia o temperaturze  $T_{wewn}$  oraz urządzeń wewnętrznych.

Dla temperatury powierzchni przegród otaczających dany obiekt, bilans energii musi uwzględniać zarówno akumulację ciepła w przegrodach zewnętrznych, jak i wnikanie ciepła do tych przegród od urządzeń wewnętrznych ( $q_{wewn}$ ) oraz zysków słonecznych ( $q_{słon}$ ), z kolejnym poziomem temperatur w warstwie  $x_1$  (krok przestrzenny), wg wzoru:

$$\alpha_{c,j}(T_{wewn}(t) - T_{sc,j;x=0}(t)) + \sum_{i=1}^N \alpha_{r,i}(T_{sc,i;x=0}(t) - T_{sc,j;x=0}(t)) + q_{słon}(t) + q_{wewn}(t) = \rho_j c_j \frac{\Delta x}{2} (T_{sc,j;x=0}(t + \Delta t) - T_{sc,j;x=0}(t)) / \Delta t - \lambda_{sc,j} A_{sc,j} (T_{sc,j;x_1}(t) - T_{sc,j;x=0}(t)) / \Delta x \quad (5-30)$$

Temperatura powierzchni przegród w kolejnym kroku czasowym  $t+\Delta t$  obliczana jest wg następującego wzoru:

$$T_{sc,j;x=0}(t + \Delta t) = T_{sc,j;x=0}(t) + \frac{2\Delta t}{\rho_{sc,j} c_{sc,j} \Delta x} \left( \frac{\lambda_j (T_{sc,j;x_1}(t) - T_{sc,j;x=0}(t))}{\Delta x} + \alpha_{c,j} (T_{wewn}(t) - T_{sc,j;x=0}(t)) + \sum_{i=1}^N \alpha_{r,i} (T_{sc,i;x=0}(t) - T_{sc,j;x=0}(t)) + \frac{q_{słon}(t) + q_{wewn}(t)}{\Delta y \Delta z} \right) \quad (5-31)$$

### Blok obliczeniowy dla całego obiektu

Temperatura wewnętrzna obiektu o objętości  $V$  jest zależna jedynie od temperatur powierzchni przegród otaczających dany obiekt, obliczonych przy użyciu powyższego bilansu, oraz od bezpośrednich zysków ciepła ( $q_{ogrzew}$ ). W celu obliczenia temperatury wewnętrznej obiektu, wykorzystuje się następujący bilans:

$$\sum_{i=1}^N A_{sc,i} \alpha_{c,i} (T_{sc,i;x=0}(t) - T_{wewn}(t)) - \frac{\rho c V}{\Delta t} (T_{wewn}(t + \Delta t) - T_{wewn}(t)) + q_{ogrzew}(t) + q_{wewn}(t) = 0 \quad (5-32)$$

W momencie, gdy wartości temperatury przegród  $T_{sc,j;x=0}$  są zadane, zmiana temperatury wewnętrznej pomieszczenia, może być obliczona bezpośrednio dla kroku czasowego  $t+\Delta t$ :

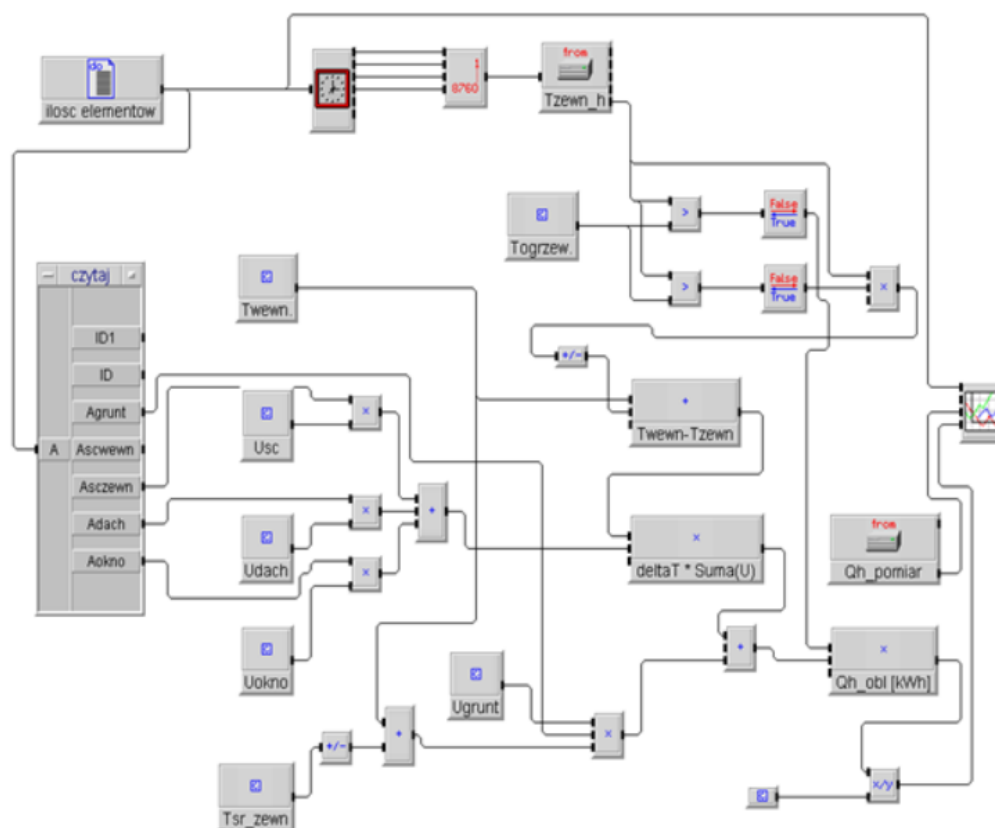
$$T_{wewn}(t + \Delta t) = T_{wewn}(t) + \left( \frac{\Delta t}{\rho c V} \right) \left( \sum_{i=1}^N A_{sc,i} \alpha_{c,i} (T_{sc,i;x=0}(t) - T_{wewn}(t)) + q_{ogrzew}(t) + q_{wewn}(t) \right) \quad (5-33)$$

### 5.3 Implementacja modeli w środowisku symulacyjnym INSEL

W ostatniej fazie procesu prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej osiedla SHP, modele matematyczne opisane w punkcie 5.2, zostały zaimplementowane w środowisku symulacyjnym INSEL. Zależności matematyczne zapisane zostały w bloki programowe, które w połączeniu z blokami dotyczącymi przedziału czasowego, dla którego obliczenia są dokonywane, czy też z blokami zawierającymi zmienne w czasie dane pogodowe, czy w końcu bloki zawierające wartości pomiarowe zużycia energii ciepłej, pozwoliły przeprowadzić symulację zapotrzebowania na energię ciepłą i weryfikację tych wyników.

#### 5.3.1 Model 1

W celu zaimplementowania modelu matematycznego opisanego w rozdziale 5.2.1 w środowisku symulacyjnym, wykorzystano standardowe funkcje programu INSEL, takie jak funkcje sumowania, dzielenia, mnożenia i funkcje logiczne. Funkcje te pozwoliły na zaprogramowanie modelu 1 w celu przeprowadzenia symulacji godzinowego zapotrzebowania na energię ciepłą. W celu przeprowadzenia obliczeń w warunkach jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych, zaimplementowano w model również godzinowe wartości temperatury zewnętrznej, zmierzone przy pomocy stacji pogodowej. Rys. 5-11 przedstawia schemat blokowy/logiczny modelu 1 zaimplementowany w środowisku symulacyjnym INSEL.



Rys. 5-11: Schemat blokowy modelu 1 zaimplementowany w środowisku symulacyjnym INSEL.

Gdzie:

ID – numer identyfikacyjny obiektu

Agrunt – powierzchnia rzutu obiektu [m<sup>2</sup>]

Ascwewn – całkowita powierzchnia ścian wewnętrznych [m<sup>2</sup>]

Asczewn - całkowita powierzchnia ścian zewnętrznych [m<sup>2</sup>]

Adach – powierzchnia stropodachu [m<sup>2</sup>]

Aokno – całkowita powierzchnia okien [m<sup>2</sup>]

Usc – współczynnik przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej [W/m<sup>2</sup>K]

Udach - współczynnik przenikania ciepła dla stropodachu [W/m<sup>2</sup>K]

Uokno - współczynnik przenikania ciepła dla okna [W/m<sup>2</sup>K]

Ugrunt - współczynnik przenikania ciepła dla podłogi [W/m<sup>2</sup>K]

Tsr\_zewn – temperatura gruntu; tu założono 9°C [°C]

Tzewn\_h - godzinowe wartości temperatury zewnętrznej (zmierzone przy pomocy stacji pogodowej) [°C]

Togrzew – temperatura powyżej której obiekt należy ogrzewać; tu 15°C [°C]

Qh\_pomiar – godzinowe wartości zużycia energii cieplnej z pomiaru [kWh]

Qh\_obl – godzinowe wartości zapotrzebowania na energię cieplną (z symulacji) [kWh]

Blok o nazwie „czytaj”, widoczny z lewej strony Rys. 5-11, umożliwił wprowadzenie do modelu symulacyjnego danych geometrycznych dla każdego elementu sieci grzewczej osiedla SHP. Dane te zostały wcześniej pozyskane przy pomocy systemu geoinformacyjnego i odnoszą się one do powierzchni przegród zewnętrznych, których przykład pokazano w tabeli 5-2.

**Tabela 5-2: Odcinek pliku danych geometrycznych.**

ID	Agrunt	Ascwewn	Asczewn	Adach	Aokno
13	265	165	652	265	89
14	281.1	158.7	67.408	281.1	9.192
15	260.6	158.2	660.616	260.6	90.084
16	271.8	16.7	692.648	271.8	94.452
17	238.4	169.6	63.36	238.4	8.64
19	192.8	112	496.24	192.8	124.06
20	202.4	113	509.6	202.4	127.4
21	197.7	112.1	515.68	197.7	128.92
22	216.5	108.4	516.8	216.5	129.2
23	230	114.6	562.32	230	140.58
24	260.6	107.3	599.84	260.6	149.96

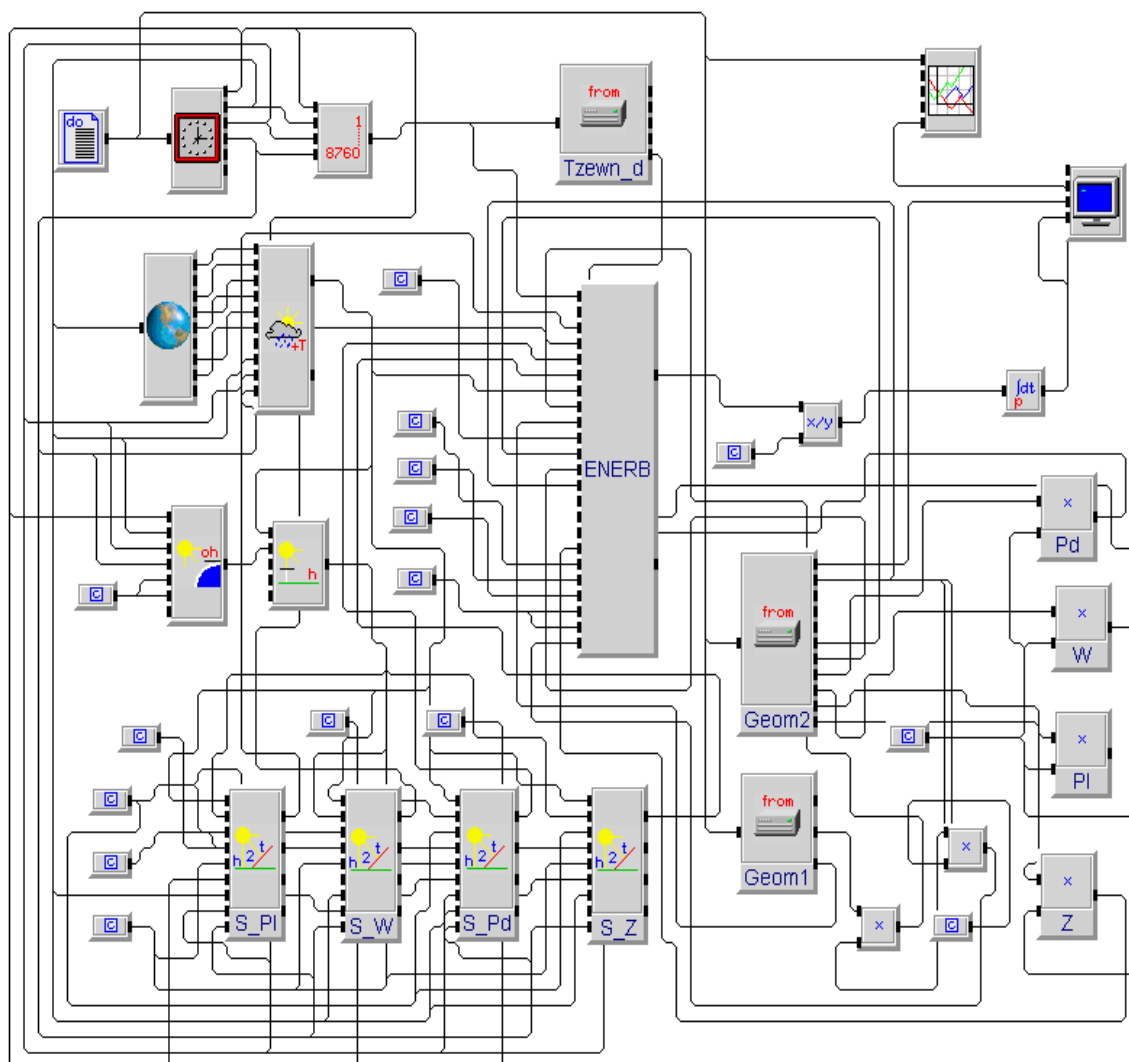
Model pobiera dane z tej macierzy, kolejno dla każdego elementu sieci grzewczej osiedla SHP z osobna i wprowadza je do modelu 1 w celu obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną. Po przeprowadzeniu tych obliczeń dla pierwszego elementu (ID = 13), model pobiera dane dla kolejnego elementu (ID = 14), i dokonuje nowego obliczenia. Proces ten odbywa się tak długo, dopóki zapotrzebowanie na energię cieplną nie jest obliczone dla wszystkich elementów sieci grzewczej osiedla SHP.

Roczne przebiegi zapotrzebowania na energię ciepłą o interwale czasowym jednej godziny, dla każdego odbiorcy sieci grzewczej osiedla SHP, są wartościami wyjściowymi z modelu symulacyjnego.

W przypadku symulacji dziennej i miesięcznej wykorzystuje się jako dane wejściowe średniodobowe i średniomiesięczne wartości pogodowe (tu: temperatura zewnętrzna), a wynikiem symulacji są dzienne i miesięczne wartości zapotrzebowania na energię ciepłą.

### 5.3.2 Model 2

W podobny sposób, jak w przypadku modelu 1, model 2 również zaimplementowano w środowisku symulacyjnym INSEL. Z uwagi na to, że model 2 charakteryzuje się bardziej kompleksową strukturą niż model 1, gdyż uwzględnia on więcej składników bilansu energetycznego, konieczne było wykorzystanie dodatkowych funkcji i bloków w programie INSEL, jak pokazano na Rys. 5-12.



Rys. 5-12: Schemat blokowy modelu 2 zaimplementowany w środowisku symulacyjnym INSEL.

Gdzie:

Tzewn\_d – temperatura zewnętrzna (ze stacji pogodowej) – wartości średniodobowe [°C]

oh – natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię horyzontalną [W/m<sup>2</sup>]

h - godzinowe natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię horyzontalną [W/m<sup>2</sup>]

S\_Pl - natężenie promieniowania słonecznego padającego na przegrodę zewnętrzną obiektu o orientacji północnej[W/m<sup>2</sup>]

S\_W - natężenie promieniowania słonecznego padającego na przegrodę zewnętrzną obiektu o orientacji wschodniej[W/m<sup>2</sup>]

S\_Pd - natężenie promieniowania słonecznego padającego na przegrodę zewnętrzną obiektu o orientacji południowej[W/m<sup>2</sup>]

S\_Z - natężenie promieniowania słonecznego padającego na przegrodę zewnętrzną obiektu o orientacji zachodniej[W/m<sup>2</sup>]

ENERB – blok obliczający zapotrzebowanie na energię cieplną wg normy DIN 18599

Geom1 – parametry geometryczne 1 dla poszczególnych obiektów

Geom2 – parametry geometryczne 2 dla poszczególnych obiektów

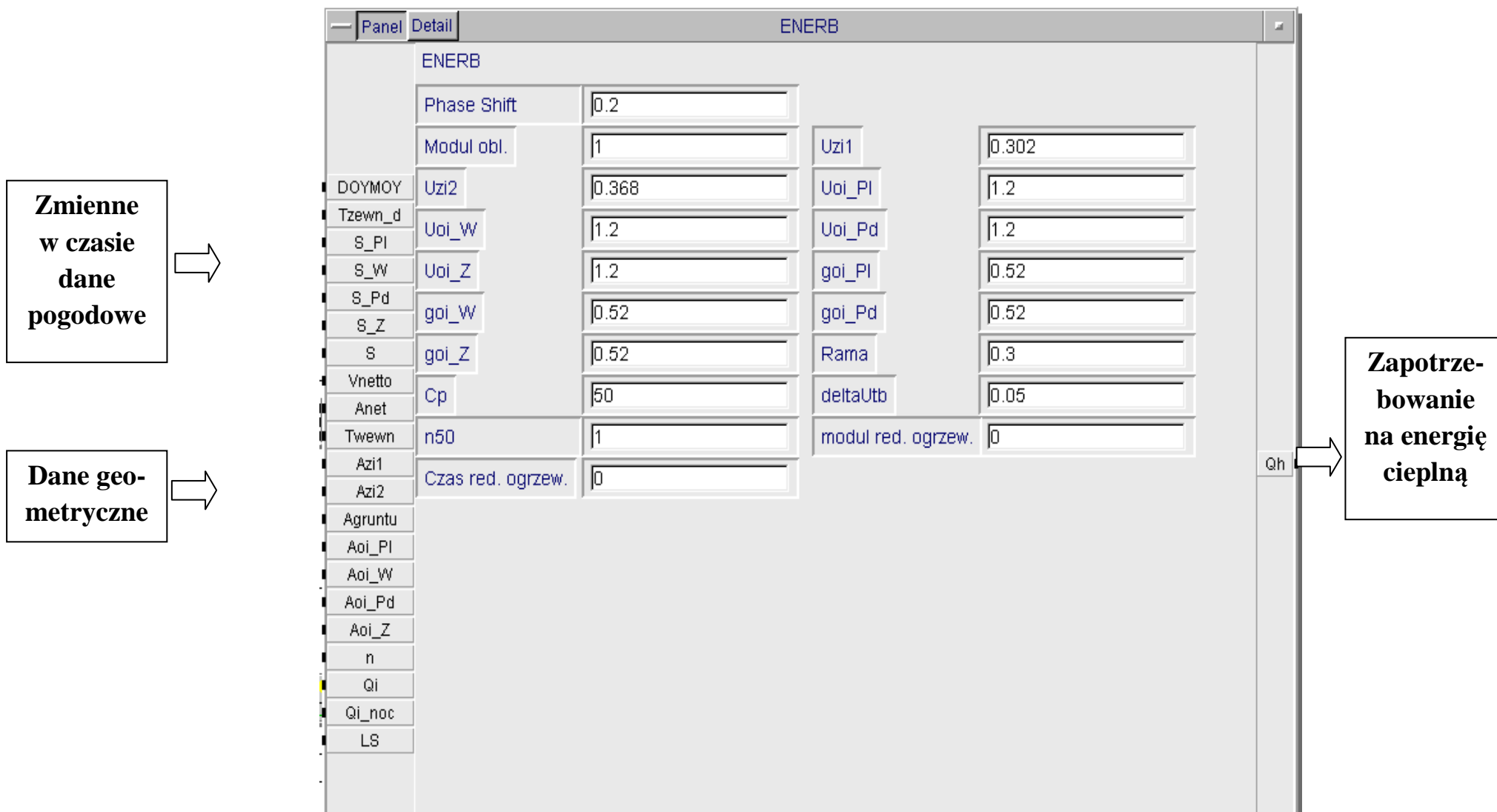
Pd – powierzchnia okien po południowej stronie obiektu [m<sup>2</sup>]

W – powierzchnia okien po wschodniej stronie obiektu [m<sup>2</sup>]

Pl – powierzchnia okien po północnej stronie obiektu [m<sup>2</sup>]

Z - powierzchnia okien po zachodniej stronie obiektu [m<sup>2</sup>]

Block o nazwie ENERB, patrz Rys. 5-13, którego model matematyczny zawarty jest w załączniku 10, umożliwia obliczanie zapotrzebowania na energię cieplną z uwzględnieniem zysków ciepła od promieniowania słonecznego, wewnętrznych zysków ciepła oraz strat ciepła przez przenikanie przez zewnętrzne przegrody, jak i wentylacyjnych strat ciepła. Blok ten był już dostępny, ale umożliwiał on jedynie symulację zapotrzebowania na energię cieplną dla jednego obiektu. W pracy niniejszej wykorzystano ten blok i dostosowano dla potrzeb całej sieci grzewczej, łącząc go z kolejnymi blokami, zawierającymi dane pogodowe, dane geometryczne, itd.. Umożliwiło to w efekcie końcowym przeprowadzenie symulacji zapotrzebowania na energię cieplną całej sieci grzewczej osiedla SHP, i jej poszczególnych odbiorców.



Rys. 5-13: Blok obliczeniowy ENERB do obliczania zapotrzebowania na energię ciepłą.

gdzie:

DOYMOY – skala czasowa (dzień, miesiąc)

Vnetto – kubatura ogrzewanego obiektu [m<sup>3</sup>]

Anet – powierzchnia obiektu netto [m<sup>2</sup>]

Azi1 – całkowita powierzchnia przegród zewnętrznych [m<sup>2</sup>]

Azi2 – powierzchnia dachu [m<sup>2</sup>]

Agrunt – powierzchnia podłogi [m<sup>2</sup>]

Aoi\_Pl – powierzchnia okien po stronie północnej [m<sup>2</sup>]

Aoi\_W – powierzchnia okien po stronie wschodniej [m<sup>2</sup>]

Aoi\_Pd – powierzchnia okien po stronie południowej [m<sup>2</sup>]

Aoi\_Z – powierzchnia okien po stronie zachodniej [m<sup>2</sup>]

n – krotność wymian powietrza [1/h]

Qi – zyski wewnętrzne [W]

Qi\_noc – zyski wewnętrzne w godzinach nocnych [W]

LS – współczynnik przewodzenia ciepła przez powierzchnię gruntu; równy 2,0 W/m<sup>2</sup>K

Zarówno zmienne w czasie dane pogodowe (temperatura zewnętrzna, natężenie promieniowania słonecznego), jak i stałe dla każdego obiektu dane geometryczne, które pobierane są z pliku tekstowego widocznego w tabeli 5-2, wprowadzone zostały do bloku ENERB dla każdego odbiorcy sieci grzewczej z osobna. Wszystkie uśrednione dane wejściowe, takie jak np. wartości współczynników przenikania przegród U, wprowadzono bezpośrednio do bloku ENERB, ponieważ nie ulegają one zmianie podczas całego toku obliczeń. Tak skomponowany blok ENERB posłużył do obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną dla każdego odbiorcy sieci grzewczej osiedla SHP z osobna.

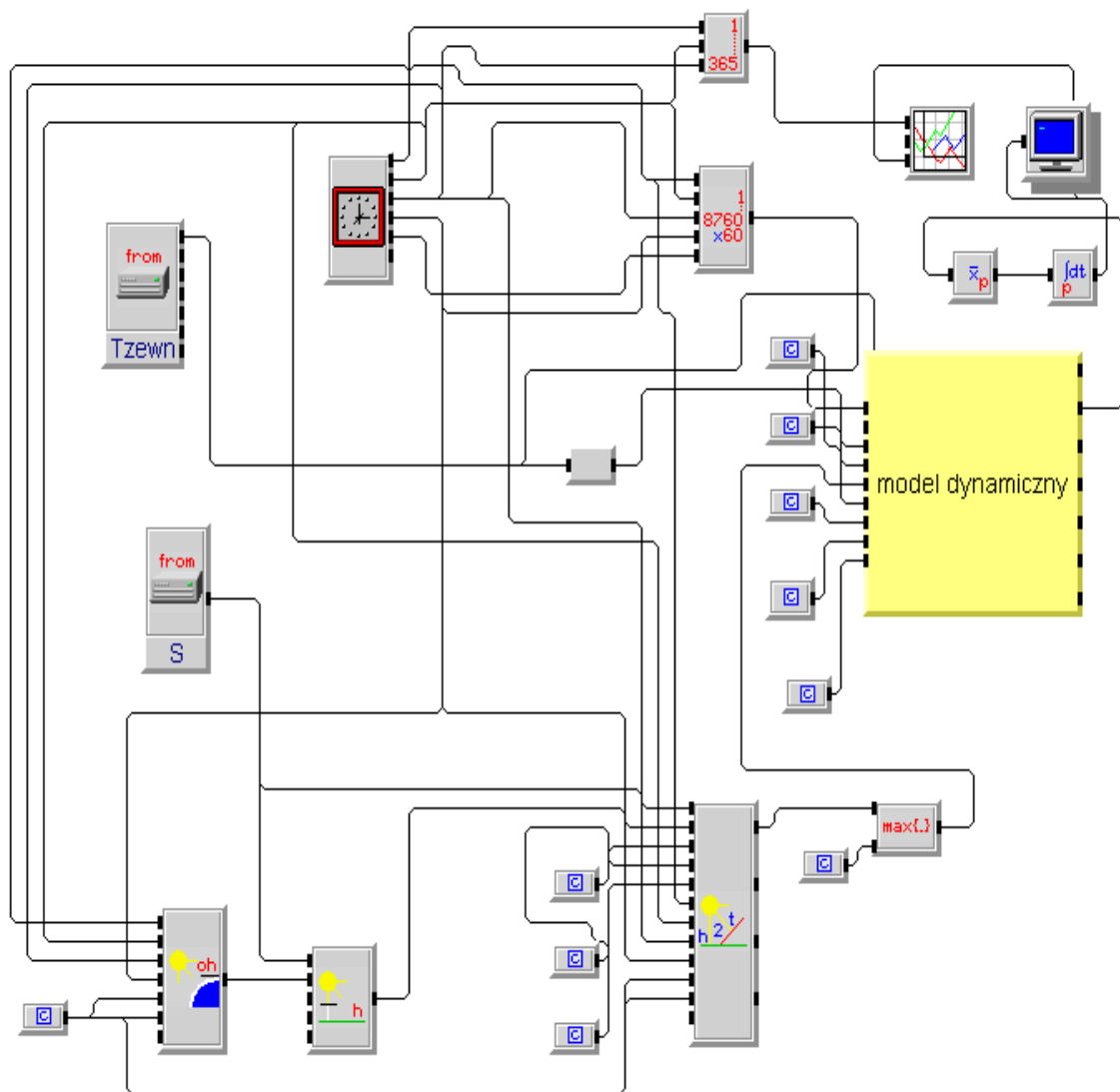
W celu uwzględnienia w modelu natężenia promieniowania słonecznego padającego na ściany obiektu o różnych kierunkach geograficznych (północ, wschód, południe i zachód), wykorzystuje się specjalny blok programu INSEL. Blok ten umożliwia przeliczenie godzinowych wartości natężenia promieniowania słonecznego zmierzonych przy użyciu stacji pogodowej odpowiednio dla każdego kierunku geograficznego ścian obiektu.

Wyniki obliczeń z bloku ENERB są, w zależności od interwału czasowego wprowadzanych danych wejściowych, wartościami godzinowymi, średniodobowymi i miesięcznymi zapotrzebowania na energię cieplną dla każdego odbiorcy sieci grzewczej z osobna.



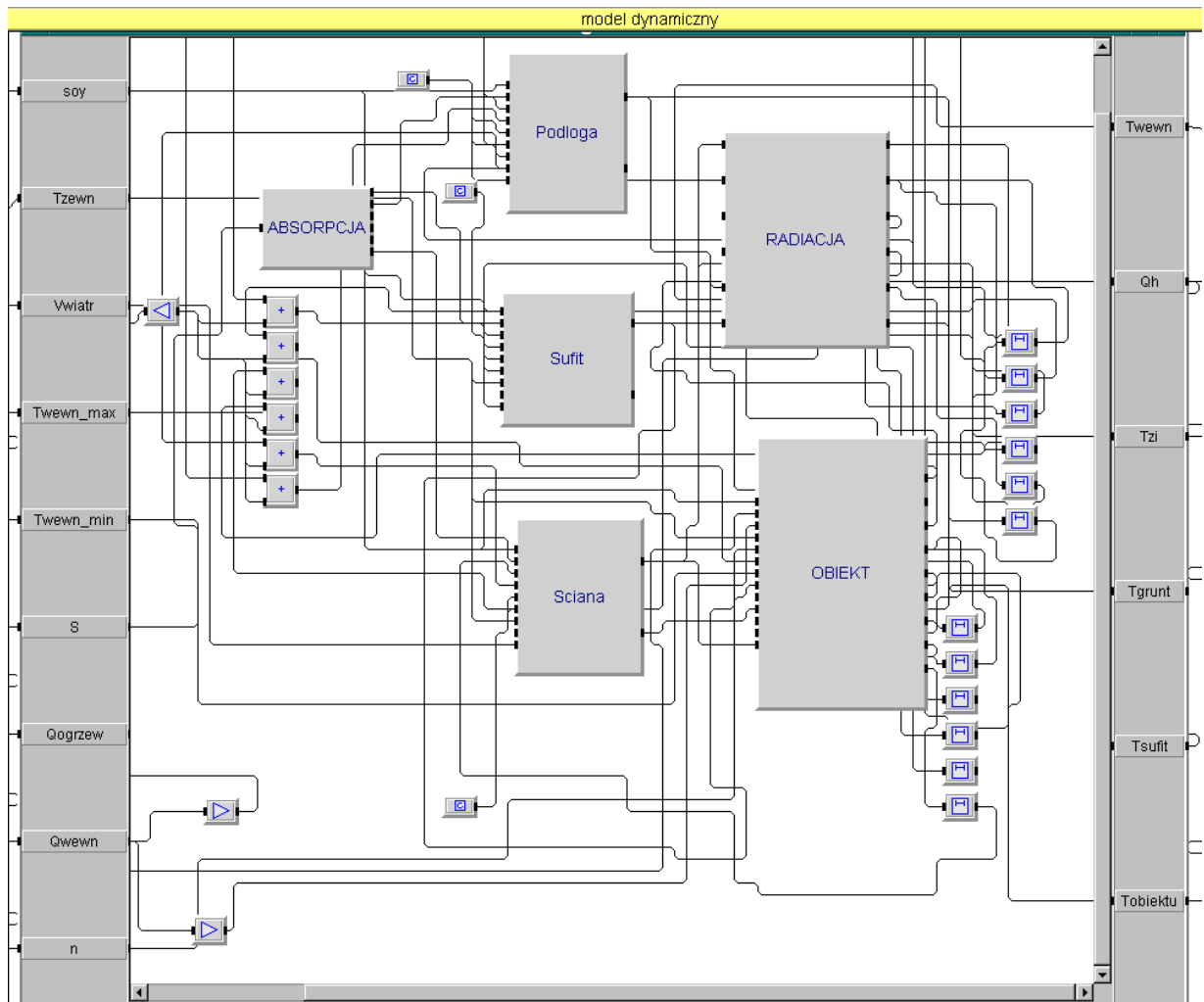
### 5.3.3 Model 3

Również w przypadku dynamicznego modelu 3 wykorzystano środowisko symulacyjne INSEL, jak widać na Rys. 5-14. Model ten był już dostępny, więc ograniczono się do jego wykorzystania i dostosowania do własnych potrzeb. Model umożliwił symulację zapotrzebowania na energię ciepłą dla pomieszczenia testowego (wartości 5-minutowe) i obiektu testowego (wartości godzinowe). W przypadku bowiem pomieszczenia testowego dysponuje się 5-minutowymi wartościami zużycia energii ciepłej, natomiast w przypadku obiektu testowego, wartościami godzinowymi. Z uwagi na to, iż dla pozostałych obiektów analizowanego osiedla dostępne są jedynie roczne wartości pomiarowe zużycia energii ciepłej, model 3 nie został dla nich wykorzystany.



Rys. 5-14: Schemat blokowy modelu 3 zaimplementowany w środowisku symulacyjnym INSEL.

W celu zaimplementowania poszczególnych procesów dynamicznego obliczania zapotrzebowania na ciepło, opisanych matematycznie w rozdziale 5.2.3, wykorzystano kilka bloków, widocznych na Rys. 5-15.



Rys. 5-15: Poszczególne bloki modelu dynamicznego [64].

Gdzie:

soy – skala czasowa

Vwiatr – prędkość wiatru [m/s]

Twewn\_max – maksymalna temperatura wewnętrzna w obiekcie [°C]

Twewn\_min - minimalna temperatura wewnętrzna w obiekcie [°C]

Qwewn - zyski wewnętrzne [W]

Tzi – temperatura ściany zewnętrznej [°C]

Tgrunt – temperatura podłogi [°C]

Tsufit – temperatura sufitu [°C]

Tobiektu - temperatura wewnętrzna obiektu na wyjściu [°C]

ABSORPCJA – blok obliczeniowy uwzględniający rozkład promieniowania słonecznego

Podloga – blok obliczeniowy dla podłogi

Sufit – blok obliczeniowy dla sufitu  
Sciana – blok obliczeniowy dla ściany  
OBIEKT – blok obliczeniowy dla całego obiektu  
RADIACJA – blok obliczeniowy dla promieniowania (radiacji)

Model 3 składa się z kilku oddzielnych bloków, połączonych ze sobą odpowiednimi funkcjami. Opis bloków, opisany dokładniej w pracy Pietruschka [64], przedstawia się następująco:

- 1) bloku obliczeniowego dla przegród zewnętrznych (ściana, podłoga, sufit), uwzględniającego przenikanie ciepła oraz akumulację ciepła w tych przegrodach, o nazwie *Sciana, Podłoga, Sufit*:

Blok ten pozwala rozwiązać równania na jednokierunkowe przewodzenie ciepła przez powierzchnie poszczególnych przegród danego obiektu, składających się z kilku warstw o różnych grubościach i wartościach współczynnika przewodzenia ciepła. Jako dane wejściowe bloki te wykorzystują wartości zysków słonecznych i temperatury zewnętrznej po zewnętrznej stronie danej przegrody, po jej wewnętrznej stronie zaś, zysków ciepła od promieniowania (radiacja) od sąsiednich przegród, zysków ciepła poprzez konwekcję od powietrza wewnątrz obiektu. W ten sposób dokonuje się nie tylko obliczenia zmiany temperatur w poszczególnych przegrodach, ale również wyznacza się przewodzenie ciepła przez te przegrody.

- 2) bloku obliczeniowego, przy pomocy którego wyznacza się rozkład promieniowania słonecznego przechodzącego przez powierzchnie okien, na poszczególne powierzchnie przegród danego obiektu, o nazwie *ABSORPCJA*:

Blok ten wykorzystuje do tego celu współczynniki absorpcyjne, które zdefiniowane zostają w tym bloku dla każdej z powierzchni przegród z osobna.

- 3) bloku obliczeniowego, który uwzględnia wymianę ciepła poprzez promieniowanie (radiację) pomiędzy poszczególnymi przegrodami otaczającymi dany obiekt, o nazwie *RADIACJA*:

Blok ten umożliwia obliczenie strumienia ciepła poprzez promieniowanie pomiędzy powierzchniami przegród danego obiektu, charakteryzującymi się różnymi temperaturami. W obliczeniu tym, emisja promieniowania długofalowego netto każdej z tych powierzchni jest wyznaczana z wartości emisji własnej każdej z tych powierzchni zredukowanej przez absorpcję promieniowania od pozostałych przegród.

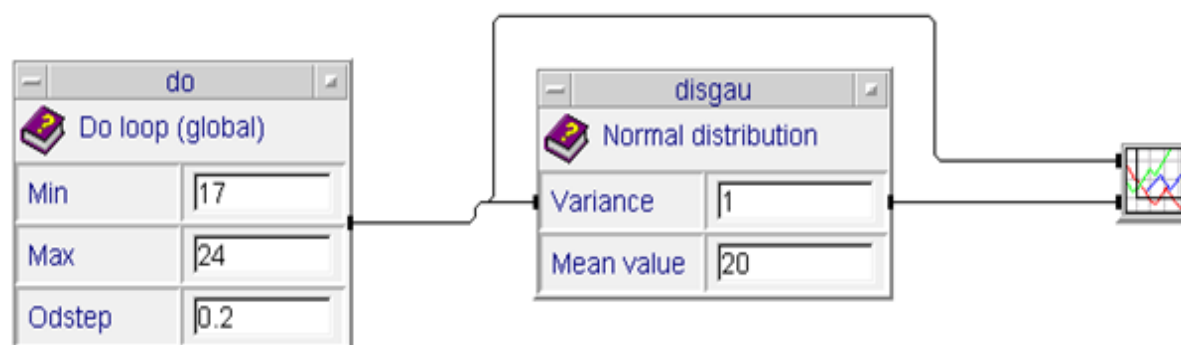
- 4) bloku obliczeniowego dla całego obiektu, który umożliwia obliczenie temperatury wewnętrznej w obiekcie przy uwzględnieniu konwekcyjnych zysków ciepła, o nazwie *OBIEKT*:

Nowo wyznaczone temperatury przegród przy użyciu bloku 1) służą jako dane wejściowe do obliczenia temperatury wewnętrznej całego obiektu, które odbywa się przy użyciu bloku obliczeniowego dla całego obiektu. Blok ten oblicza temperaturę powietrza wewnątrz obiektu, przy uwzględnieniu zysków ciepła poprzez konwekcję od poszczególnych przegród

tego obiektu, zysków ciepła od ogrzewania oraz konwekcyjnej części zysków ciepła od zysków wewnętrznych (np. od osób, urządzeń elektrycznych). Wartością wyjściową z tego bloku jest temperatura wewnętrzna obiektu oraz wartość zysków ciepła poprzez konwekcję do poszczególnych przegród tego obiektu.

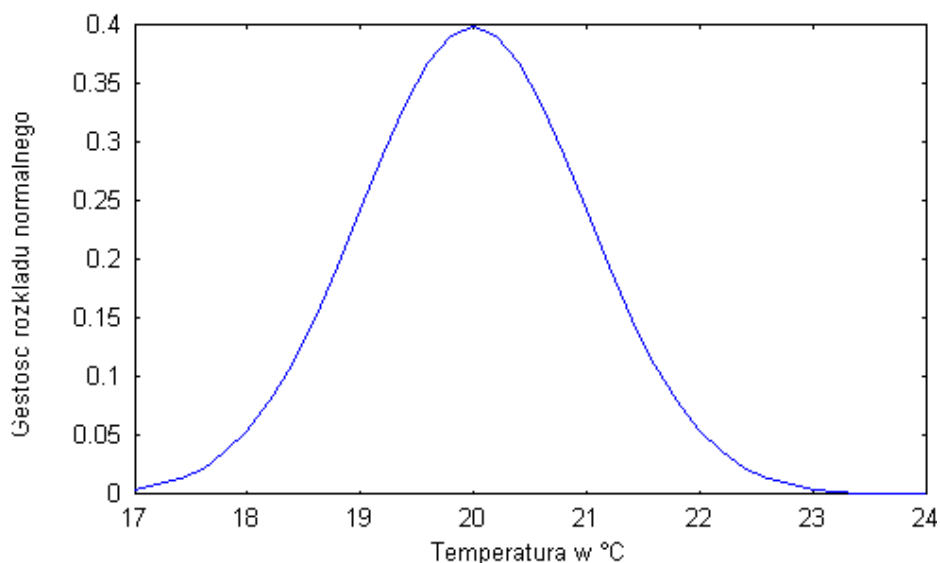
### 5.3.4 Blok obliczeniowy dla parametrów użytkowych

W celu uwzględnienia różnych wartości parametrów użytkowych, jak np. temperatury wewnętrznej, w symulacji zapotrzebowania na energię cieplną, wykorzystano odpowiedni algorytm przy wykorzystaniu dostępnych w programie INSEL bloków obliczeniowych. Schemat ten, widoczny na Rys. 5-16, oblicza losowo wartości temperatury wewnętrznej. Wartości te w kolejnym kroku, wykorzystano do obliczeń symulacyjnych zapotrzebowania na energię cieplną sieci grzewczej osiedla SHP.



Rys. 5-16: Blok obliczeniowy parametrów użytkowych.

Rys. 5-17 pokazuje krzywą rozkładu normalnego o wartości średniej  $\mu = 20^{\circ}\text{C}$  i wariancji  $\sigma^2 = 1$ .



Rys. 5-17: Rozkład normalny Gaussa dla temperatury wewnętrznej.

Gęstość krzywej rozkładu normalnego, oznaczona konwencjonalnie przez  $\rho(t)$ , opisana jest równaniem:

$$\rho(t) = N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} N e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5-34)$$

Gdzie:

t – temperatura [°C]

$N_e$  – całkowita liczba zmiennych

$\mu$  – wartość oczekiwana temperatury w rozkładzie, w tym przypadku: 20°C

$\sigma$  – odchylenie standardowe rozkładu

## 5.4 Dane wejściowe do modeli symulacyjnych

W celu przeprowadzenia prognozy zapotrzebowania na energię ciepłą całych sieci grzewczych osiedli, jednym z najważniejszych etapów, jak już wspomniano wcześniej, jest proces pozyskania i obróbki danych wejściowych dla każdego odbiorcy sieci. Od dostępności i dokładności danych wejściowych do modeli symulacyjnych zależy bowiem wiarygodność wyników obliczeniowych. W tym celu, w niniejszej pracy położono szczególny nacisk na opracowaniu metodyki szybkiego i zautomatyzowanego procesu pozyskiwania danych geometrycznych i cieplnych dla pojedynczych odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla SHP, przy zachowaniu odpowiedniej dokładności. W zależności od tego, jaką dokładność wyników będziemy chcieli osiągnąć, będziemy musieli dysponować odpowiednią skalą czasową tych danych, jak i ich dokładnością.

### 5.4.1 Dane geometryczne

W celu wyznaczenia geometrii, a dokładniej kubatury poszczególnych elementów sieci grzewczej analizowanego osiedla SHP, zastosowano metodę skaningu laserowego. W tym celu wykorzystano kartograficzne dane laserowe dla całej powierzchni analizowanego osiedla (4 km<sup>2</sup>). Dane te pozyskane zostały podczas przeprowadzonego w roku 2002 lotu samolotem wyposażonym w przyrząd do pomiaru wysokości poszczególnych punktów laserowych. W kolejnym kroku, punkty te wprowadzono do systemu geoinformacyjnego przy pomocy programu GeoMedia Professional. Odpowiednia aplikacja tego programu o nazwie GeoMedia Grid, pozwoliła na przyporządkowanie ich do powierzchni rzutu poszczególnych obiektów osiedla na mapie w formacie DXF. Po dokonaniu tego procesu, punkty laserowe w obrębie każdego obiektu analizowanego osiedla poddane zostały obróbce, w celu rozgraniczenia ich od powierzchni rzutu nie przynależących do żadnego obiektu mieszkalnego.

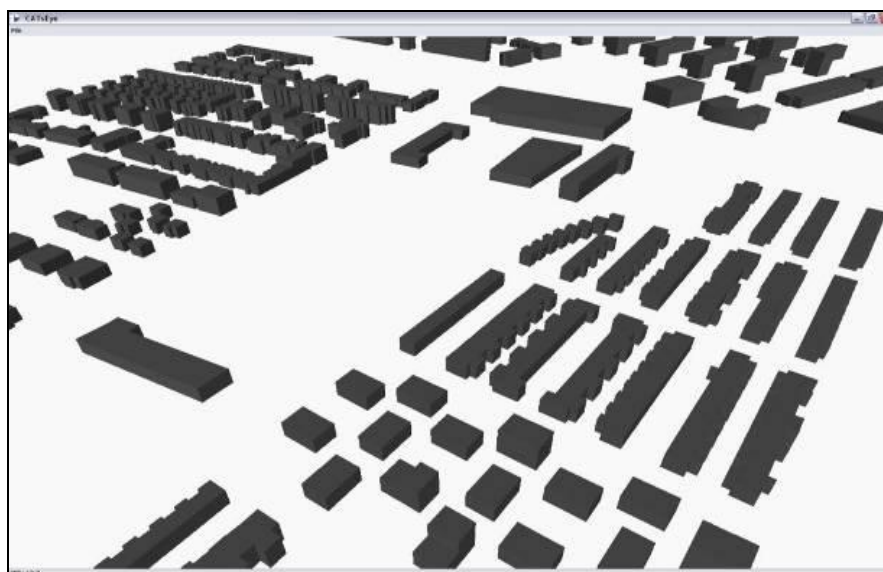
Przyporządkowanie punktów laserowych do powierzchni rzutu poszczególnych obiektów osiedla SHP umożliwiło wyznaczenie wysokości każdego z nich. W tym celu, wartości wysokości wszystkich punktów laserowych należących do danego obiektu zostały uśrednione

osobno dla punktów dolnych i górnych. Po odjęciu uśrednionej wartości dolnej od górnej otrzymano wysokość każdego obiektu analizowanego osiedla. Wysokości kilku obiektów osiedla SHP (w metrach) przedstawiono za pomocą różnej gamy kolorów na Rys. 5-18.



Rys. 5-18: Mapa tematyczna wysokości obiektów (w metrach) osiedla SHP.

Tak przygotowane dane, dotyczące wysokości i powierzchni rzutu każdego obiektu osiedla SHP umożliwiły stworzenie trójwymiarowego modelu osiedla, widocznego na Rys. 5-19.



Rys. 5-19: Trójwymiarowy model osiedla osiedla [92].

Trójwymiarowy model osiedla wykorzystano następnie do obliczenia powierzchni przegród zewnętrznych dla każdego obiektu analizowanego osiedla. Obliczenie zapotrzebowania na energię cieplną oparte zostało w głównej mierze na określeniu strat ciepła poprzez przegrody zewnętrzne każdego analizowanego obiektu osiedla. Założono bowiem, iż różnice temperatury wewnętrznej pomiędzy poszczególnymi pomieszczeniami danego obiektu nie są wyższe niż 4K. Każdemu obiektowi przyporządkowano numer identyfikacyjny, tzw. ID, jak widać na Rys. 5-20.



Rys. 5-20: po prawej stronie: odcinek z mapy geoinformacyjnej pokazujący powierzchnie rzutu kilku domków szeregowych, po lewej stronie: zdjęcie tych obiektów.

Wyniki zestawiono w tabeli 5-3 dla czterech przykładowych obiektów z Rys. 5-20.

Tabela 5-3: Powierzchnie przegród zewnętrznych dla czterech wybranych obiektów osiedla SHP.

Nr obiektu (ID)	Powierzchnia rzutu [m <sup>2</sup> ]	Powierzchnia przegród zewnętrznych [m <sup>2</sup> ]	Powierzchnia dachów [m <sup>2</sup> ]
1	64	177	64
2	73	162	73
3	62	141	62
4	53	96	53

Dane geometryczne z powyższej tabeli zostały wyznaczone przy pomocy systemu geoinformacyjnego z dokładnością co do 2-3 cm długości i 4-5 cm<sup>2</sup> powierzchni i następnie wprowadzone do modeli symulacyjnych w celu obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną.

#### 5.4.2 Dane do obliczeń cieplnych

Metoda prognozowania zapotrzebowania na energię cieplną proponowana w niniejszej pracy, wykorzystuje wartości współczynników przenikania ciepła przegród  $U$  dla zewnętrznych przegród każdego z obiektów analizowanego osiedla. Z uwagi na to, że analizowane osiedle jest nowoczesnym osiedlem niskoenergetycznym, wartości te są niemalże jednakowe dla wszystkich badanych obiektów. Dlatego, w celu wyznaczenia wartości współczynników  $U$  dla wszystkich obiektów osiedla SHP zrezygnowano z zastosowania skomplikowanej, a zarazem kosztownej metody termowizji, a wartości te przyjęto z dostępnych świadectw energetycznych dla kilku obiektów i uśredniono dla

pozostałych obiektów. Z uwagi na to, że obiekty mieszkalne osiedla SHP podzielone zostały na dwie grupy (1-wsza grupa to obiekty jedno- i dwurodzinne, 2-ga grupa to obiekty wielorodzinne), uśrednienie współczynników U przeprowadzono osobno dla każdej grupy, co pokazane jest w tabeli 5-4.

**Tabela 5-4: Uśrednione wartości U dla dwóch głównych grup odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP**

Część elementu	Przegrody boczne	Przegroda górna	Przegroda dolna	Przegroda przezroczysta
<b>Kategoria obiektów</b>	<b>Grupa 1 - Obiekty wielorodzinne</b>			
<i>Uśredniona wartość U [W/m<sup>2</sup>K]</i>	0,24	0,21	0,56	1,2
<b>Kategoria obiektów</b>	<b>Grupa 2 – Obiekty jedno- i dwurodzinne</b>			
<i>Uśredniona wartość U [W/m<sup>2</sup>K]</i>	0,22	0,16	0,21	1,3

## 5.5 Weryfikacja modeli symulacyjnych obliczających zapotrzebowanie na ciepło grzewcze

W celu wykazania poprawności działania modeli symulacyjnych do prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej niskoenergetycznego osiedla SHP, zastosowano proces weryfikacji przy użyciu wartości pomiarowych zużycia energii ciepłej o różnych stopniu ich szczegółowości.

W większości dotychczasowych prac badawczych, ze względu na brak dostatecznej ilości wartości pomiarowych, proces weryfikacji jest często pomijany lub przeprowadzany jedynie ogólnikowo. Niniejsza praca, dzięki dostępności wielu danych pomiarowych zużycia energii ciepłej, umożliwiła przeprowadzenie tego procesu w oparciu o różne stopnie szczegółowości.

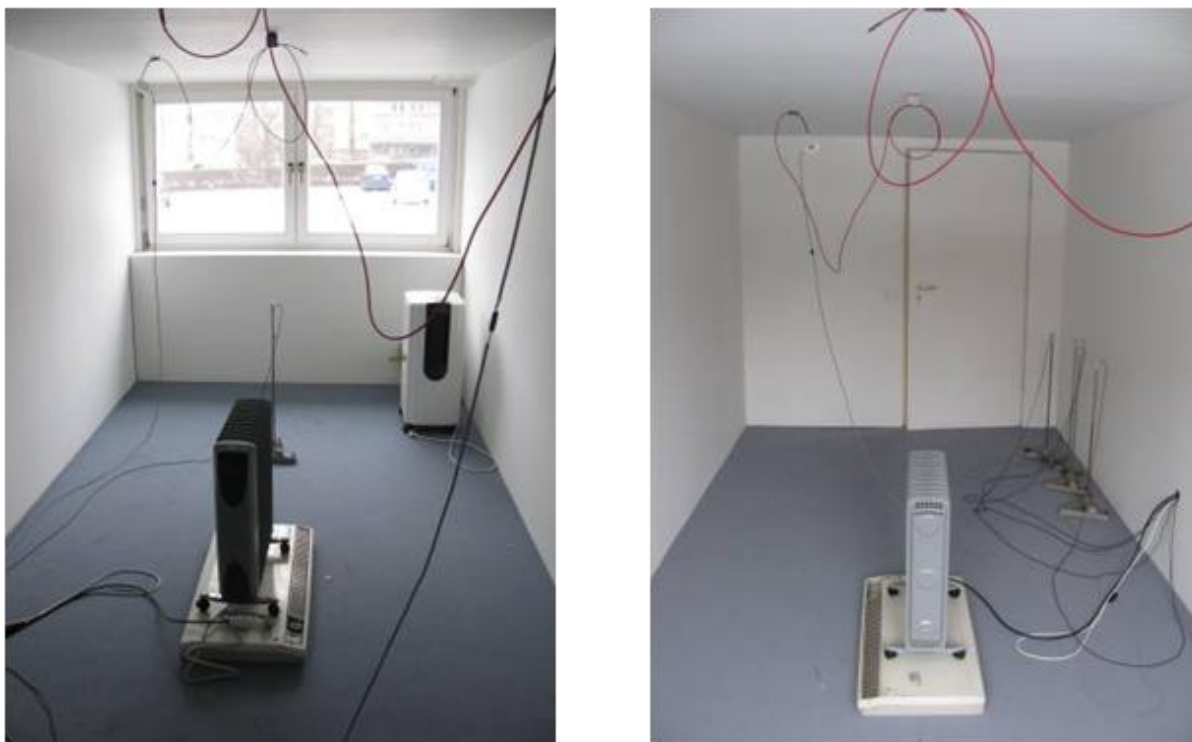
W przypadku małego pomieszczenia testowego, pomiaru zużycia energii ciepłej dokonano samodzielnie przy użyciu aparatury pomiarowej, skompletowanej i zainstalowanej wraz z jednym ze współpracowników uczelni technicznej w Stuttgarcie [93]. Monitoring zużycia energii ciepłej rzeczywistego obiektu testowego, znajdującego się na osiedlu SHP, zrealizowany został również samodzielnie przy udziale jednego ze współpracowników wyżej wspomnianej uczelni, który jest specjalistą w dziedzinie monitoringu. Natomiast, roczne wartości zużycia energii ciepłej dla wszystkich obiektów osiedla SHP, udostępnione zostały poprzez elektrociepłownię Esslingen (SWE) i samodzielnie wprowadzone do specjalnej bazy danych.

Z uwagi na to, iż tylko w przypadku dwóch obiektów (małego pomieszczenia testowego i rzeczywistego obiektu testowego) dostępne są szczegółowe dane pomiarowe, zdecydowano się na dokładniejszą analizę tylko w przypadku tych obiektów.



### 5.5.1 Pomieszczenie testowe

Pomieszczenie testowe znajdujące się w jednym z budynków uczelni technicznej w Stuttgarcie pozwoliło na przeprowadzenie pomiarów w warunkach kontrolowanych w celu weryfikacji modeli symulacyjnych opisanych w rozdziale 5.2. Wnętrze pomieszczenia zilustrowane jest na Rys. 5-21.

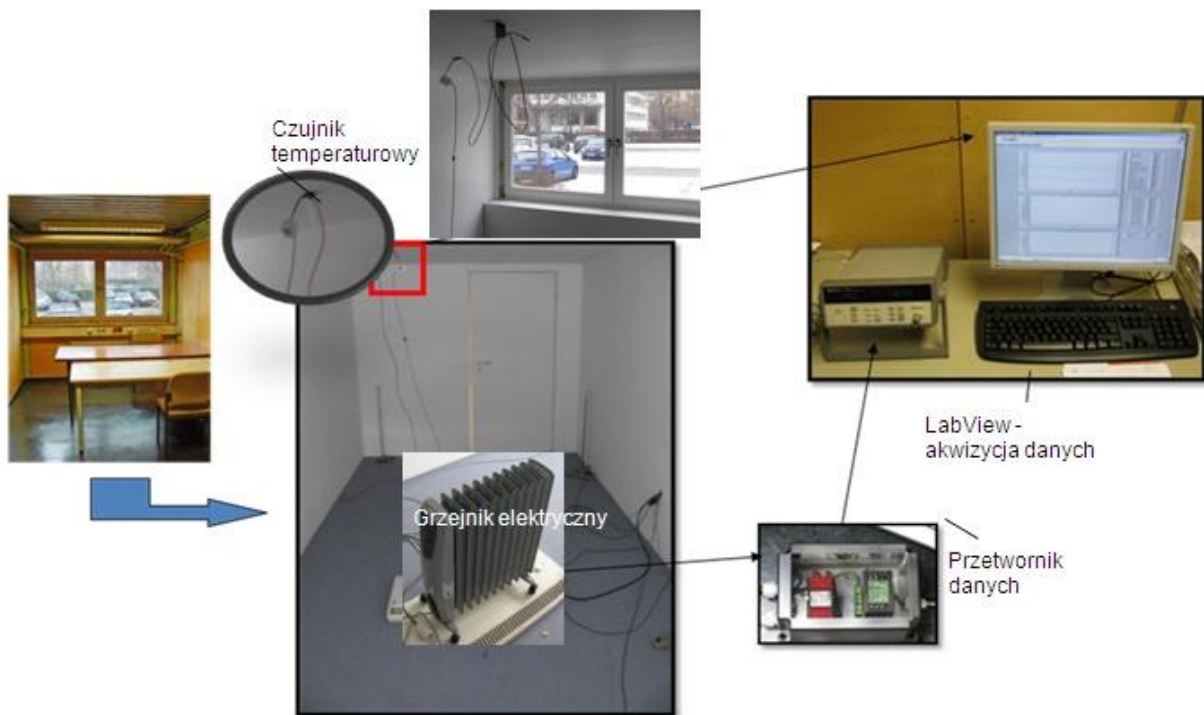


Rys. 5-21: Wnętrze pomieszczenia testowego.

Pomieszczenie testowe, widoczne na powyższym rysunku, posiada wymiary 5,84 x 2,31 x 2,08 m (długość x szerokość x wysokość). Okno pomieszczenia skierowane jest na południowy-wschód ( $154,5^\circ$  od północy). Pomieszczenie testowe graniczy z trzema sąsiednimi pomieszczeniami, znajdującymi się z prawej i lewej strony tego pomieszczenia. Trzecie sąsiadujące pomieszczenie znajduje się u góry pomieszczenia testowego. Podłoga pomieszczenia testowego ma bezpośredni kontakt ze środowiskiem zewnętrznym.

W pomieszczeniu testowym przepływ ciepła odbywa się od grzejnika poprzez powietrze w pomieszczeniu oraz zewnętrzne przegrody pomieszczenia (okno, ściana zewnętrzna, podłoga) do otoczenia. Na proces wymiany ciepła mają wpływ w głównej mierze oddziaływania warunków zewnętrznych, takich jak temperatura zewnętrzna, promieniowanie słoneczne i prędkość wiatru. Do pomieszczenia w wyniku różnicy ciśnień i temperatury, dopływa określony strumień powietrza zewnętrznego, wyrażony krotnością wymiany powietrza. Powietrze to miesza się z powietrzem wewnętrznym zmieniając jego temperaturę.

Eksperyment pomiarowy dla potrzeb weryfikacji modelu symulacyjnego, obliczającego zapotrzebowanie na energię cieplną, opisany również szerzej w pracach [93], [95], przeprowadzony został przy wykorzystaniu instalacji pomiarowej widocznej na Rys. 5-22.



Rys. 5-22: Schemat pomieszczenia testowego wraz z instalacją pomiarową.

Instalacja pomiarowa składa się z następujących elementów:

- urządzenia do pomiaru poboru mocy grzejnika elektrycznego o mocy 2000 W, wraz z przetwornikiem danych,
- czujników temperatury w pomieszczeniu testowym i jemu przyległych,
- programu LabView do archiwizacji danych pomiarowych (wartości 30-sekundowe)

Program LabView (ang. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) jest to system, który wykorzystany został w celu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych zużycia energii elektrycznej na ogrzewanie pomieszczenia testowego. System blokowy, zawierający „kod źródłowy” programu, stworzony w języku G, składa się z ikon połączonych ze sobą wirtualnymi przewodami, które reprezentują elementy kontrolne, wskaźniki, procedury i funkcje. Dodatkowo, funkcje te pozwoliły na wizualizację przebiegu zmierzonych temperatur w graficznym interfejsie użytkownika. Program ten umożliwił również zapisywanie danych w celu wykorzystania ich do dalszych analiz.

W celu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych, wprowadzono następujące założenia:

- rozpatruje się przestrzenne pomieszczenie, oddzielone od otoczenia zewnętrznymi przegrodami budowlanymi (ściana zewnętrzna wraz z oknem oraz podłoga),
- pozostałe trzy ściany oraz sufit są przegrodami wewnętrznymi,
- wymiana ciepła z otoczeniem występuje poprzez ścianę zewnętrzną i podłogę oraz poprzez nieszczelności (wentylacja),
- źródłem ciepła jest grzejnik elektryczny,
- w pomieszczeniu nie uwzględnia się obecności ludzi i dodatkowych elementów wyposażenia wnętrza.

Czujniki temperaturowe zainstalowane zostały w dwóch miejscach pomieszczenia testowego (przednia i tylna część), na wysokości ok. 1,5 m (Rys. 5-22). Dodatkowo umieszczono po jednym czujniku temperaturowym w każdym z sąsiadujących pomieszczeń; z lewej, prawej strony pomieszczenia testowego, jak i nad pomieszczeniem. W celu pomiaru temperatury zewnętrznej umieszczono dodatkowy czujnik temperatury na zewnątrz pomieszczenia testowego. Wszystkie czujniki temperaturowe podłączone zostały do systemu LabView w celu akwizycji danych pomiarowych.

Proces wymiany ciepła ma charakter nieustalony, tzn. jest zależny od zmieniających się warunków zewnętrznych (temperatury zewnętrznej, promieniowania słonecznego). Wartości współczynników przenikania ciepła zewnętrznych przegród budowlanych  $U$  zostały przyjęte na podstawie posiadanych planów i zestawiono w tabeli 5-5.

**Tabela 5-5: Wartości współczynników  $U$  dla poszczególnych przegród.**

Parametry	Współczynnik $U$ ( $W/m^2K$ )	Grubość (m)
Zewnętrzna przegroda	0,45	0,140
Wewnętrzny sufit	0,5	0,200
Strop wewnętrzny	0,5	0,215
Wewnętrzne ścianki	0,5	0,110
Okno	2,7	-

Eksperyment pomiarowy dla potrzeb weryfikacji wartości obliczeniowych wykonany został w ściśle określonych warunkach i dla różnych okresów czasu. Pomiary odbyły się:

- w trybie ciągłego ogrzewania,
- z przerwą nocną w ogrzewaniu.

Podczas realizacji badań, niezależnie od temperatury zewnętrznej, utrzymywano stałą temperaturę powietrza wewnętrznego w badanym pomieszczeniu. Utrzymanie wymaganej temperatury w pomieszczeniu testowym zrealizowano przy wykorzystaniu układu automatycznej regulacji (termostatyczny regulator grzejnikowy).

Uzyskane w czasie pomiarów wyniki, rejestrowano na dysku komputera w odstępie czasu 30 s, a następnie uśredniono je do wartości 5-minutowych.

### **5.5.2 Obiekt realny osiedla SHP – „obiekt testowy”.**

W celu przeprowadzenia weryfikacji modeli zapotrzebowania na energię cieplną w warunkach rzeczywistych, czyli w trybie eksploatacji sieci grzewczej osiedla SHP, w pierwszej kolejności wykorzystano obiekt testowy, zasilany energią cieplną z sieci osiedlowej. Jest nim obiekt mieszkalny (ID=535) znajdujący się w środkowej części osiedla SHP (Rys. 5-23). Obiekt ten został wybrany przy współpracy z firmą budowlaną, która również była zaangażowana w projekt POLYCITY.



Rys. 5-23: Zdjęcie i usytuowanie obiektu testowego na osiedlu SHP .

Analizowany wolnostojący obiekt testowy, o powierzchni ogrzewanej równej 1688 m<sup>2</sup> składa się z 12 podobiektów, które zamieszkuje 40 użytkowników. Podstawowe dane obiektu testowego zamieszczono w tabeli 5-6.

Tabela 5-6: Dane ogólne obiektu testowego.

Typ obiektu	Obiekt o użyteczności mieszkalnej
Rok oddania do użytku	2006
Liczba kondygnacji	4
Pole powierzchni netto [m <sup>2</sup> ]	1605 m <sup>2</sup>
Pole powierzchni brutto [m <sup>2</sup> ]	1688 m <sup>2</sup>
Kubatura ogrzewana obiektu [m <sup>3</sup> ]	5015 m <sup>3</sup>
Współczynnik kształtu A/V	0,499 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Liczba mieszkań	12
Liczba osób użytkujących obiekt	40

Rys. 5-24 przedstawia elewację frontową analizowanego obiektu testowego, skierowaną na północ.



Rys. 5-24: Widok na elewację frontową (północną) obiektu testowego.

Grubość izolacji ścian zewnętrznych i dachu obiektu testowego jest równa 14 cm. Wskaźnik zapotrzebowania na ciepło grzewcze odniesiony do powierzchni użytkowej obiektu  $E_a$  wynosi w przypadku tego obiektu 45,9 kWh/m<sup>2</sup>a. Pozwala to zakwalifikować obiekt testowy do obiektów niskoenergetycznych. Okna obiektu testowego wyposażone są w podwójne szyby. Jeżeli chodzi o system grzewczy, to obiekt dysponuje niskotemperaturowym ogrzewaniem podłogowym (40/30°C). Szczegółowe dane zestawione zostały w tabeli 5-7.

Tabela 5-7: Dane dla obiektu testowego.

Element obiektu	Grubość [m]	Współczynnik U [W/m <sup>2</sup> K]
Ściana zewnętrzna	0,32	0,298
Dach	0,35	0,272
Stropy wewnętrzne	0,375	0,328
Okna		1,2
<b>System grzewczy</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	
Ogrzewanie podłogowe	40/30°C	
<b>Wentylacja</b>	<b>Krotność wymian powietrza [1/h]</b>	
	n <sub>50</sub> = 1,5 1/h (system wentylacji mechanicznej, n=0,55 1/h (wentylacja naturalna)	



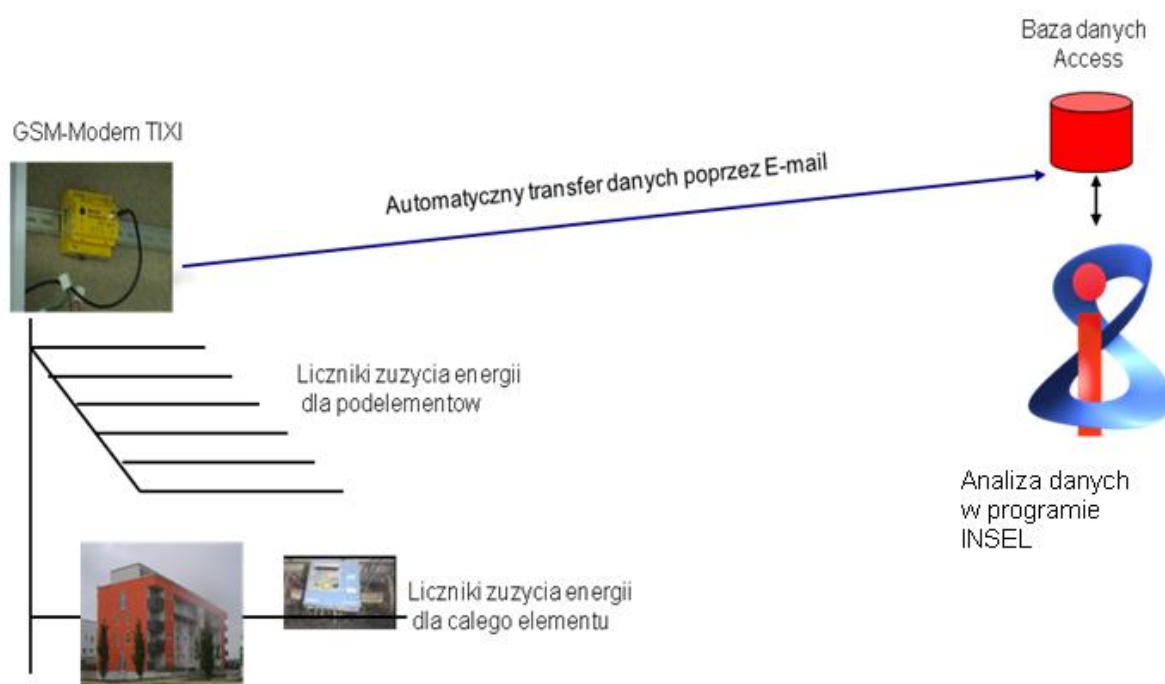
Obiekt testowy wyposażony jest w system wentylacji mechanicznej bez odzysku ciepła, widoczny na Rys. 5-25.



Rys. 5-25: System wentylacji mechanicznej w obiekcie testowym.

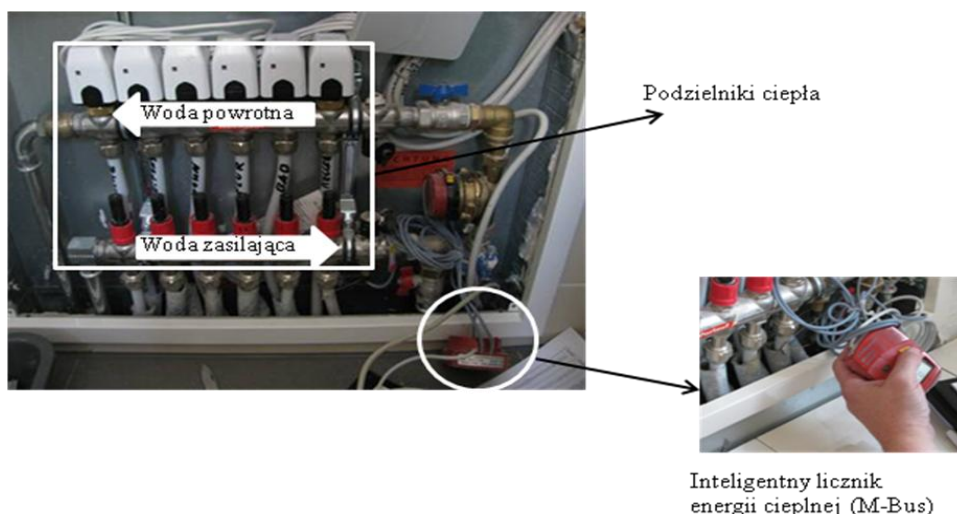
### *System opomiarowania obiektu testowego*

Do kwietnia 2008 roku, monitoring zużycia energii cieplnej obiektu testowego, odbywał się jedynie w trybie miesięcznym, poprzez manualny odczyt tych wartości bezpośrednio z licznika energii cieplnej. W kwietniu 2008 roku zainstalowano w obiekcie tzw. inteligentne liczniki energii cieplnej, które przy pomocy modemu GSM, ze zintegrowanym rejestratorem i portem M-Bus, umożliwiły automatyczny monitoring zużycia energii cieplnej całego obiektu testowego, jak i jego poszczególnych podobiektów. Schemat instalacji automatycznego monitoringu obiektu testowego przedstawiony został na Rys. 5-26.



Rys. 5-26: Monitoring zużycia energii cieplnej obiektu testowego [93].

Monitoring wartości zużycia energii cieplnej poszczególnych podobiektów badanego obiektu testowego, możliwy był dzięki indywidualnym licznikom zużycia energii cieplnej i podzielnikom ciepła widocznym na Rys. 5-27.



**Rys. 5-27: Podzielniki ciepła.**

Na Rys. 5-27 zauważyć można, iż każdy podobiekt wyposażony jest w indywidualny inteligentny licznik zużycia energii cieplnej (M-Bus), który umożliwia automatyczne przekazywanie zmierzonej ilości zużycia energii cieplnej z danego podobiektu do modemu zainstalowanego w piwnicy obiektu testowego. Dodatkowo, każdy z podobiektów posiada stację z podzielnikami ciepła, która służy do wskazania udziału poszczególnych pomieszczeń danego podobiektu (np. łazienka, pokój, kuchnia), w ogólnym zużyciu energii cieplnej zarejestrowanym przez licznik ciepła.

Zainstalowany w obiekcie testowym automatyczny system monitoringu zużycia energii cieplnej umożliwia pomiar godzinowych wartości zużycia energii cieplnej. Modem TIXI po zapisaniu zmierzonych wartości przesyła je przy udziale portu M-Bus poprzez E-mail na serwer uczelni. E-mail ten zawiera w załączniku arkusz Excela, w którym znajdują się godzinowe wartości zużycia energii cieplnej z poprzedniego dnia, dla poszczególnych podobiektów, a także całego badanego obiektu testowego (patrz tabela 5-8).

**Tabela 5-8: Arkusz Excela z danymi pomiarowymi zużycia energii cieplnej.**

Data	Godzina	Podobiekt 1	Podobiekt 2	Podobiekt 3	Podobiekt 4	Podobiekt 5	Podobiekt 6	Podobiekt 7	Podobiekt 8	Podobiekt 9	Podobiekt 10	Podobiekt 11	Podobiekt 12	Obiekt testowy	Woda
21.08.2011	0:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106249	94940
21.08.2011	1:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106258	94947
21.08.2011	2:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106258	94947
21.08.2011	3:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106258	94947
21.08.2011	4:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106258	94948
21.08.2011	5:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106265	94952
21.08.2011	6:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106265	94952
21.08.2011	7:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106265	94952
21.08.2011	8:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106265	94952
21.08.2011	9:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106275	94958
21.08.2011	10:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106275	94958
21.08.2011	11:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106275	94958
21.08.2011	12:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106275	94958
21.08.2011	13:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106289	94971
21.08.2011	14:00	26596	50089	9000	31664	28726	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106289	94971
21.08.2011	15:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106289	94971
21.08.2011	16:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106295	94976
21.08.2011	17:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106300	94980
21.08.2011	18:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106300	94980
21.08.2011	19:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106314	94992
21.08.2011	20:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106314	94992
21.08.2011	21:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106314	94992
21.08.2011	22:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106314	94992
21.08.2011	23:00	26596	50089	9000	31664	28727	43684	35993	32916	0	29018	18885	47240	106315	94993

Gdzie:

Podobiekt 1-Podobiekt 12 – stan liczników zużycia energii cieplnej dla podobiektów 1-12 dla badanego obiektu testowego [kWh]

Obiekt testowy – stan licznika zużycia energii cieplnej (ciepło grzewcze + woda użytkowa) dla całego obiektu testowego [kWh]

Woda – stan licznika zużycia energii cieplnej na podgrzanie wody użytkowej dla całego obiektu testowego [kWh]

W momencie, gdy dane przesłane są na serwer uczelni, archiwizowane są w bazie danych Access i wykorzystywane do dalszej obróbki i dalszych analiz, np. do weryfikacji modeli symulacyjnych obliczających zapotrzebowanie na energię cieplną.

W celu pomiaru temperatury wewnętrznej, zainstalowano w marcu 2011 roku, na okres 5 tygodni, w kilku podobiektach omawianego obiektu testowego, specjalne czujniki temperaturowe. Czujniki te umocowane zostały na ścianie jednego z pomieszczeń danego podobiektu, na wysokości 1,5 m. Czujniki posłużyły do pomiaru temperatury wewnętrznej w odstępie czasu równym 15 minut.



## **6 Wyniki pomiarowe i obliczeniowe zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczej osiedla SHP**

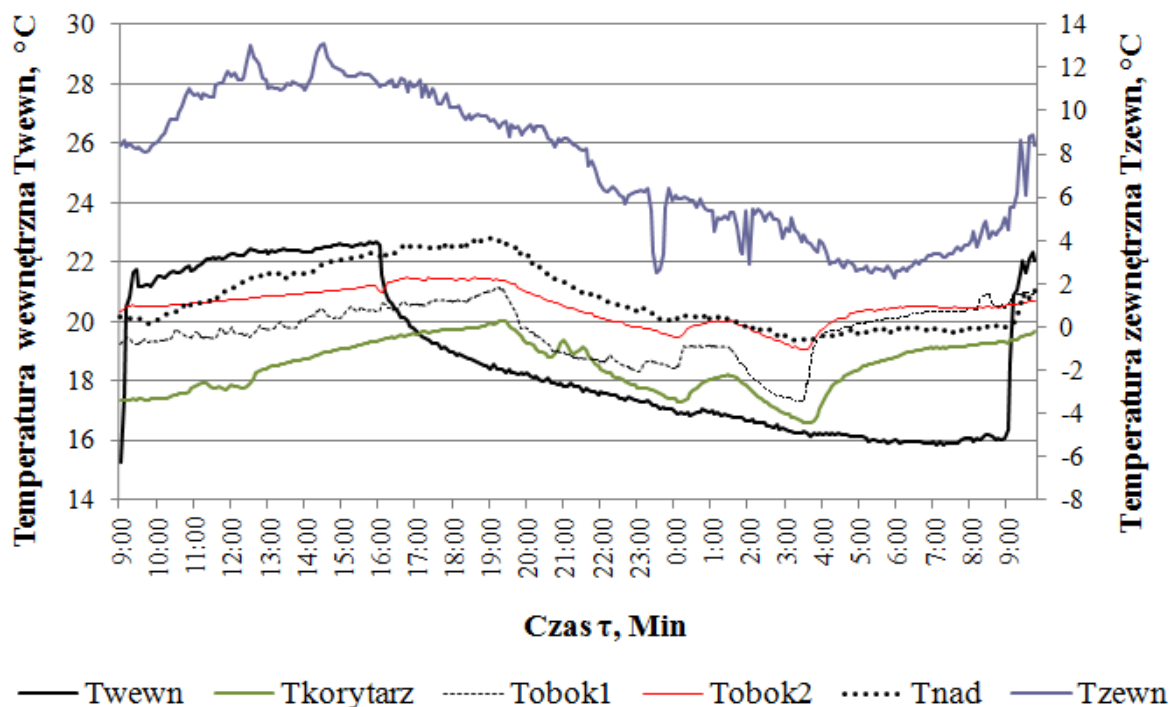
W celu przeprowadzenia symulacji zapotrzebowania na energię ciepłą dla poszczególnych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP opracowano, a po części wykorzystano dostępne modele matematyczne, które z kolei zaimplementowano w środowisku symulacyjnym INSEL. Obliczenia przeprowadzane zostały w oparciu o różne stopnie szczegółowości wprowadzanych danych wejściowych, jak i dla różnych okresów czasu. W pierwszej kolejności dokonano obliczenia godzinowych wartości zapotrzebowania na ciepło grzewcze dla pomieszczenia testowego. W kolejnym kroku, przeprowadzono obliczenia zapotrzebowania na energię ciepłą w warunkach rzeczywistych dla jednego wybranego obiektu, tzw. obiektu testowego analizowanego osiedla. W ostatnim kroku dokonano godzinowej symulacji zapotrzebowania na energię ciepłą dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP z osobna, a później zsumowano te wartości w celu uzyskania rocznego przebiegu dla całej sieci grzewczej. Pozwoliło to na wyznaczenie krzywej zmienności zapotrzebowania na energię ciepłą, która przedstawiona została w postaci wykresu uporządkowanego. W celu wykazania poprawności działania wypracowanej metodyki prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą porównano wartości obliczone z wartościami pomiarowymi z monitoringu.

### **6.1 Pomieszczenie testowe**

Przeprowadzenie pomiarów zużycia energii cieplnej w pomieszczeniu testowym posłużyło weryfikacji opracowanych modeli symulacyjnych. W pomieszczeniu testowym możliwe było przeprowadzenie pomiarów pod pełną kontrolą dzięki ograniczeniu działania parametrów użytkowych, takich jak np. brak osób. Pozwoliło to ocenić działanie modeli symulacyjnych, jak również określić ich słabe punkty.

#### **6.1.1 Analiza danych pomiarowych**

Z uwagi na to, że pomieszczenie testowe graniczy z trzema innymi pomieszczeniami, ogrzewano wszystkie pomieszczenia w celu uniknięcia zbyt wysokich różnic temperatury wewnętrznej. Pomiarów zużycia energii cieplnej dokonano jedynie w pomieszczeniu testowym. Przebieg temperatur wewnętrznych w pomieszczeniu testowym, jak i w jego sąsiadujących pomieszczeniach przedstawiony został na Rys. 6-1. Przebieg ten pokazany jest dla okresu czasu od 23 marca, od godziny 9:00 do 24 marca, do godziny 10:00 (z przerwą nocną w ogrzewaniu); ogrzewanie zostało ponownie włączone w dniu 24 marca, o godzinie 9:00.

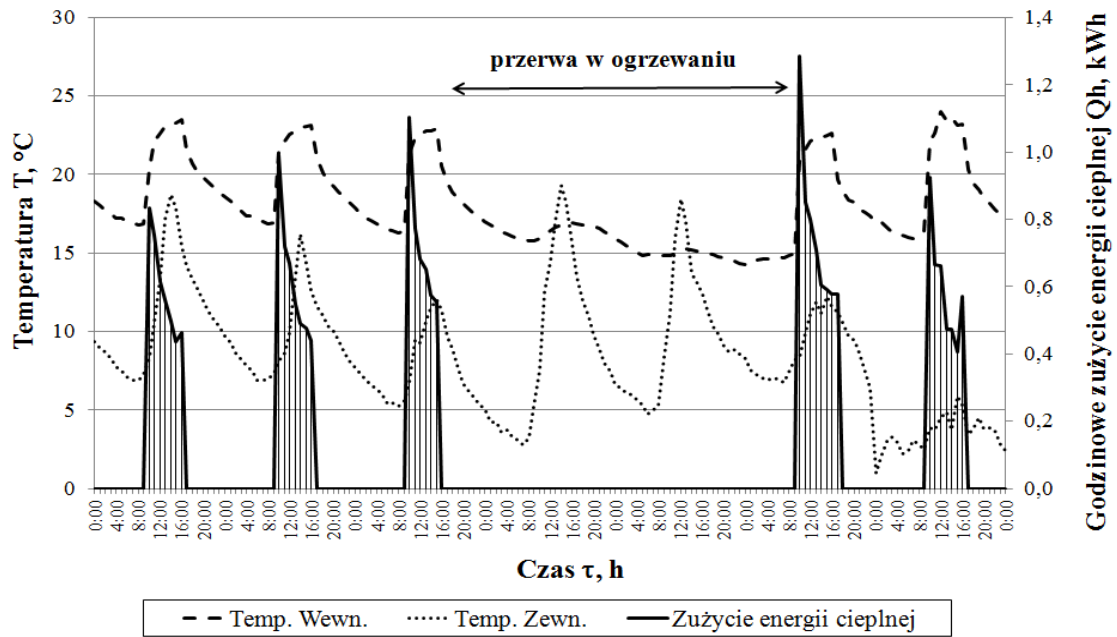


**Rys. 6-1: Przebiegi temperatur wewnętrznych w pomieszczeniu testowym i jemu przyległych.**

Jak wynika z Rys. 6-1, różnice w temperaturze wewnętrznej pomiędzy pomieszczeniem testowym, a jemu przyległymi są  $< 4K$ , dlatego wymiana ciepła poprzez ściany wewnętrzne pomieszczenia testowego mogła zostać pominięta w symulacji. Rys. 6-1 pokazuje również, iż podczas ogrzewania pomieszczenia testowego, temperatura tego pomieszczenia wzrasta do wartości zadanej przez termostatyczny regulator grzejnikowy ( $22^{\circ}C$ ) i wpływa na zmianę temperatury w pomieszczeniach jemu przyległych. Ma to związek z faktem, iż pomieszczenie testowe jest obiektem o konstrukcji lekkiej. W przypadku, gdy występują różnice pomiędzy temperaturami w poszczególnych pomieszczeniach, część ciepła zostaje oddana z pomieszczeń o wyższej temperaturze do pomieszczeń o temperaturze niższej, w celu ich wyrównania. W pracy [88] stwierdzono, że w budynkach o lekkiej konstrukcji panuje klimat o zbyt dużych dobowych wahaniach temperatury wewnętrznej.

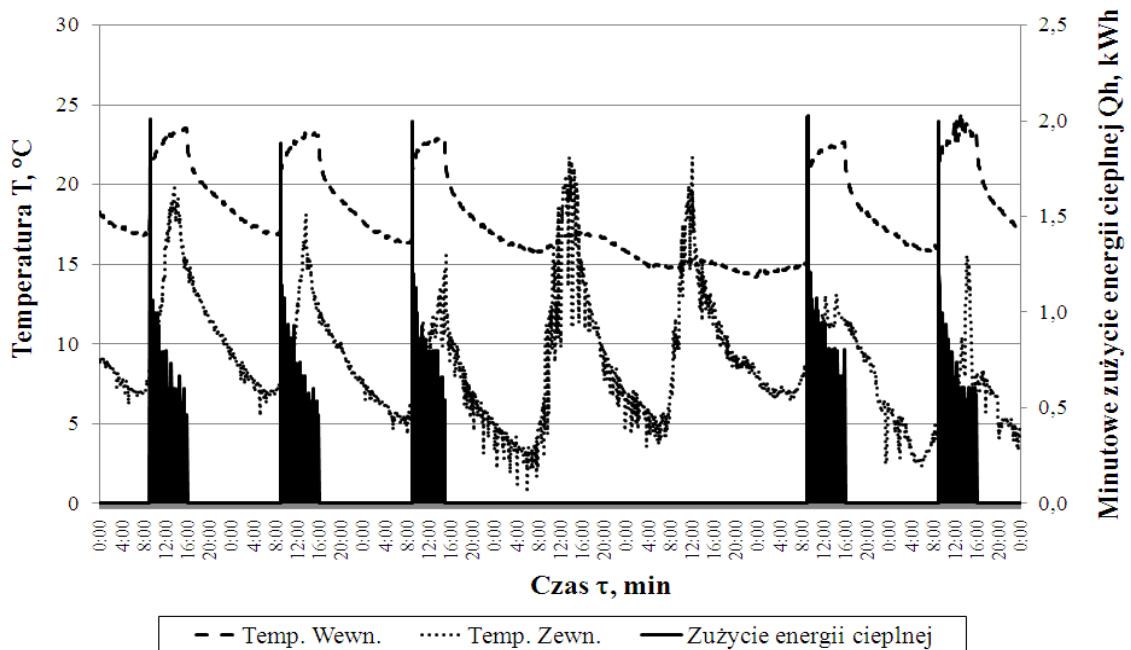
Podczas przerwy nocnej w ogrzewaniu (16:00-9:00), pomieszczenie testowe zostaje wychłodzone do temperatury równej ok.  $16^{\circ}C$ , co wynika głównie ze strat ciepła przez powierzchnie ścian zewnętrznych.

Wpływ temperatury zewnętrznej na przebieg temperatury wewnętrznej pomieszczenia testowego został pokazany dokładniej na Rys. 6-2. Pomiaru dokonano w dniach od 18 do 25 marca 2009. Podczas przeprowadzania pomiaru, monitorowane były temperatura wewnętrzna pomieszczenia testowego, zadana przez termostatyczny regulator grzejnikowy ( $22^{\circ}C$ ) i zużycie energii cieplnej potrzebnej do utrzymania tej temperatury na zadanym poziomie. Dodatkowo wprowadzono sposób ogrzewania przerywanego (z przerwą nocną w ogrzewaniu).



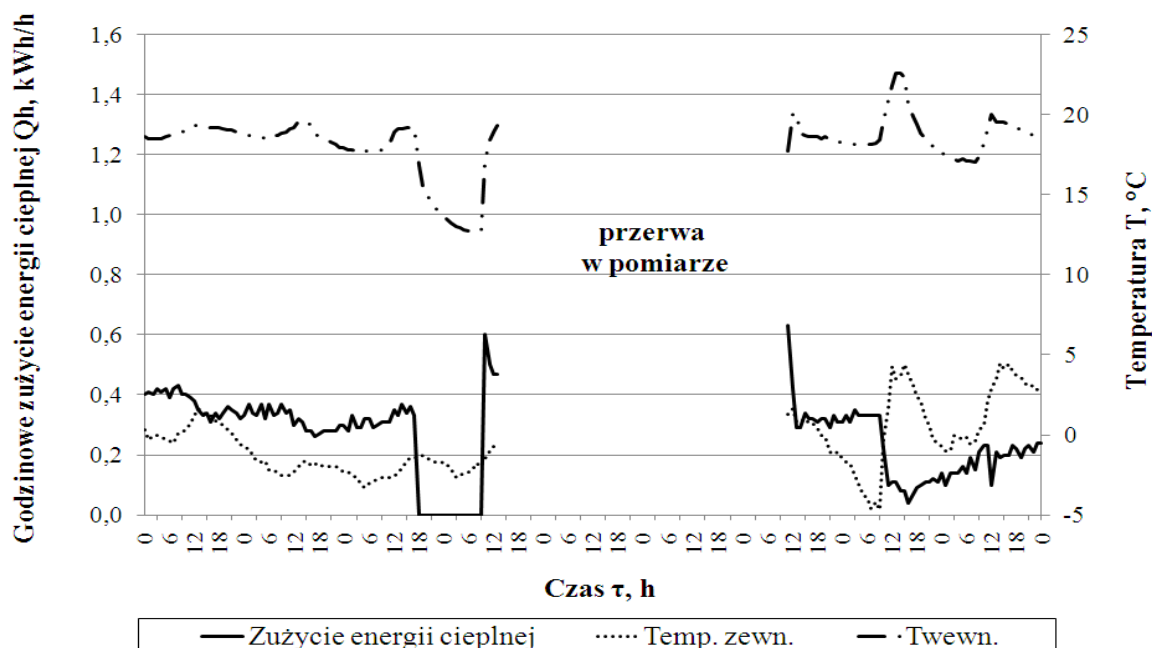
Rys. 6-2: Przebiegi temperatur i godzinowego zużycia energii cieplnej w pomieszczeniu testowym (18 do 25 marca 2009).

Analizując przebieg zużycia energii cieplnej, widoczny na Rys. 6-2, zauważalna jest szybka faza nagrzewania po przerwie nocnej w ogrzewaniu. Z kolei Rys. 6-3 pokazuje przebieg 5-minutowych wartości temperatury wewnętrznej pomieszczenia, temperatury zewnętrznej, jak i zużycia energii cieplnej, potrzebnej na podgrzanie pomieszczenia testowego. Pomiar ten dokonany został w okresie czasu od 18 marca, od godziny 00:00 do 25 marca 2009, do godziny 00:00, gdzie uwzględnione zostały przerwy nocne w ogrzewaniu, jak i dłuższa przerwa w ogrzewaniu w czasie weekendu.



Rys. 6-3: Przebieg wartości 5-minutowych w pomieszczeniu testowym (18-25 marca 2009).

Dla porównania dokonano również pomiarów w trybie ogrzewania bez przerwy nocnej w ogrzewaniu, jak widać na Rys. 6-4. Pomiary te zostały przeprowadzone w dniach od 8 lutego, od godziny 00:00 do 17 lutego do godziny 00:00, dla roku 2010.

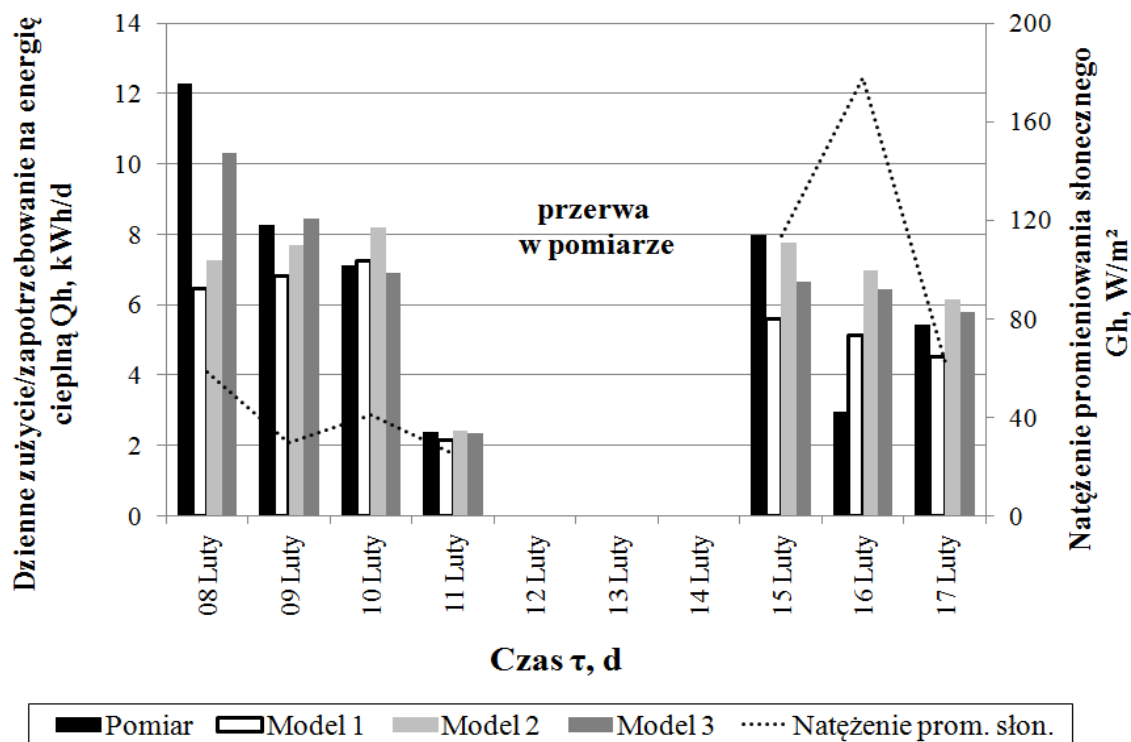


Rys. 6-4: Przebiegi danych pomiarowych w pomieszczeniu testowym (8-17 lutego 2010).

Wyniki pomiarów, przedstawione powyżej, wykorzystane zostały do weryfikacji modeli symulacyjnych obliczających zapotrzebowanie na energię ciepłą.

### 6.1.2 Weryfikacja modeli symulacyjnych

W celu szczegółowej weryfikacji modeli symulacyjnych opracowanych w niniejszej pracy, wykorzystano wartości pomiarowe zużycia energii cieplnej dla pomieszczenia testowego. W pierwszej kolejności, dokonano porównania dobowych wartości zmierzonych z obliczonymi przy pomocy wszystkich trzech modeli dla okresu czasu od 8 do 17 lutego 2010 roku.

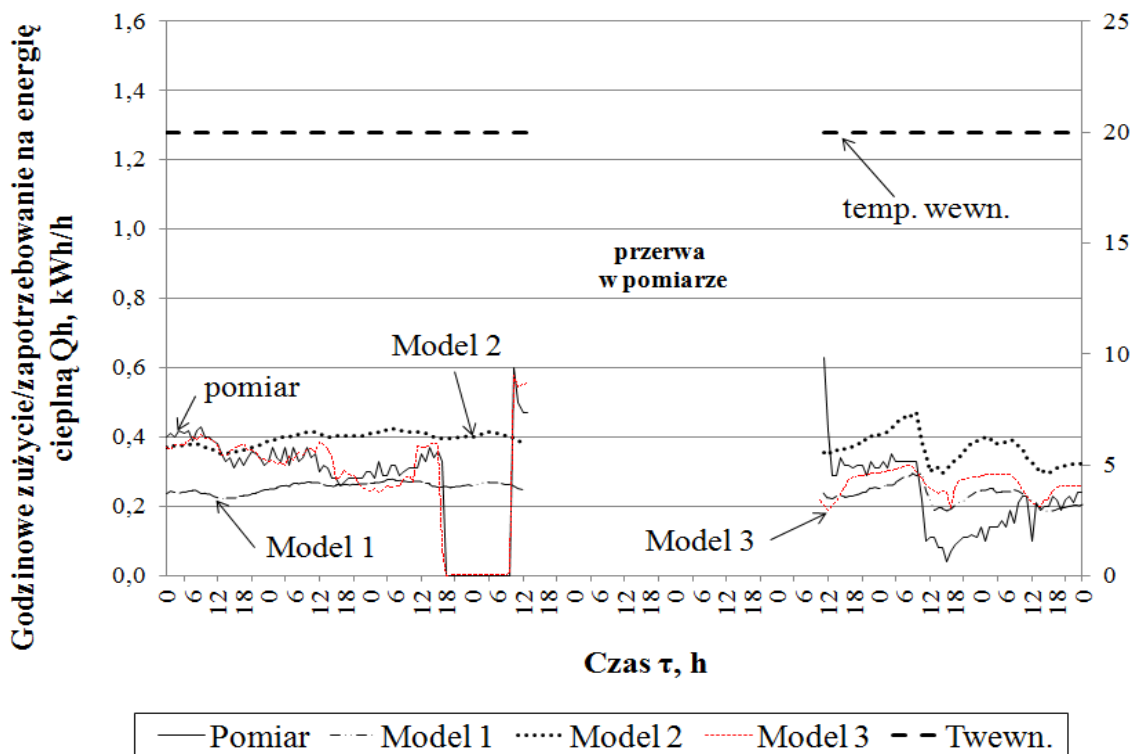


Rys. 6-5: Porównanie dobowych wartości zmierzonych z obliczeniowymi w pomieszczeniu testowym (8-17 lutego 2010).

Jak wynika z Rys. 6-5, zgodność pomiędzy pomiarem a obliczeniami z modelu 2 i 3 jest zadowalająca. Istnieją jednak znaczące odchyłki w przypadku dwóch dni: 8 i 16 lutego 2010 wynikające z różnych powodów. W przypadku odchyłki dnia 8 lutego, może mieć na nią wpływ wcześniejsza przerwa w ogrzewaniu. Ze względu na fakt, że modele 1 i 2 nie uwzględniają akumulacji ciepła w przegrodach budowlanych, nie są one w stanie uwzględnić wychłodzenia się ścian podczas przerwy nocnej w ogrzewaniu, a co za tym idzie, nie są w stanie odzwierciedlić zapotrzebowania energii cieplnej na nagrzanie ścian. Wartość z modelu 3 natomiast, z uwagi na to, iż model ten uwzględnia akumulacyjność ciepła w przegrodach, jest znacznie bardziej zbliżona do wartości pomiarowej niż w przypadku modeli 1 i 2.

Odchyłkę dnia 16 lutego można wytłumaczyć umiejscowieniem jednego z czujników temperaturowych bezpośrednio przy oknie. Intensywne natężenie promieniowania słonecznego, występujące tego dnia, spowodowało sztuczny wzrost temperatury wewnętrznej monitorowanej przez ten czujnik i tak wprowadzonej do modeli symulacyjnych. Efektem obliczeń było więc podwyższone zapotrzebowanie na energię cieplną w porównaniu do niższego rzeczywistego zużycia tej energii.

W celu dokładniejszego zobrazowania tych zależności, na Rys. 6-6 przedstawiono porównanie godzinowych wartości zmierzonych z obliczeniowymi dla okresu czasu od 8 lutego, godz. 00:00 do 17 lutego, godz. 00:00 dla roku 2010.

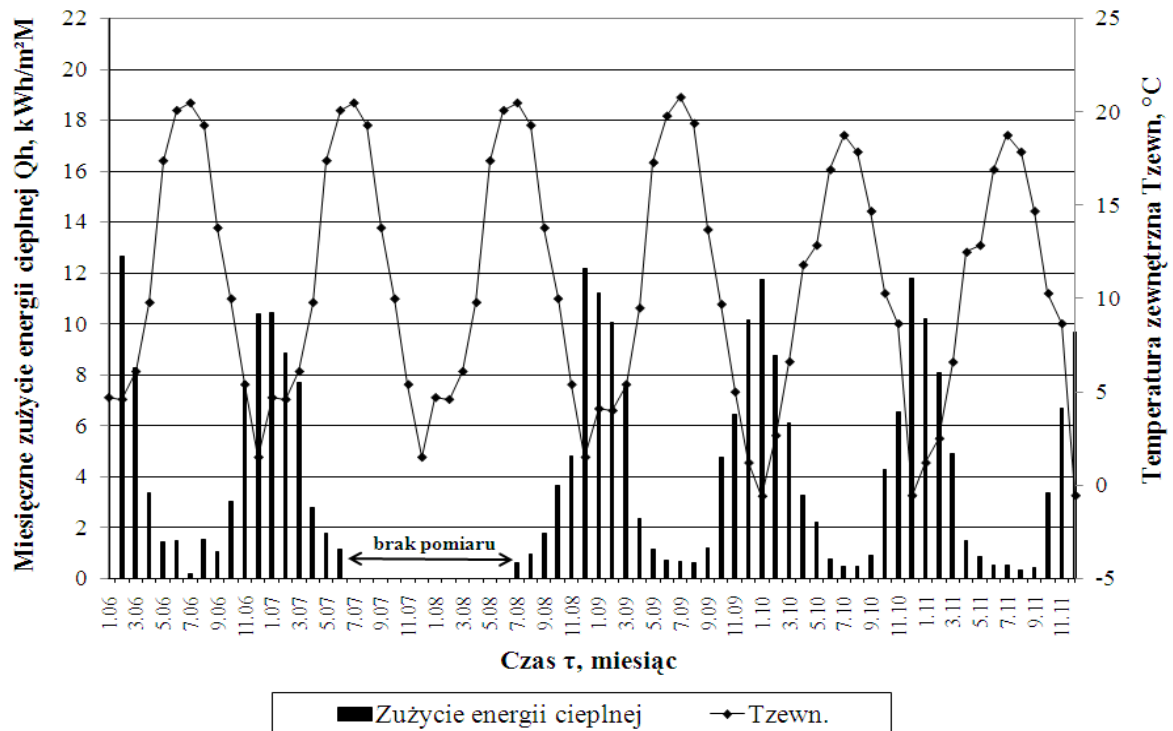


Rys. 6-6: Porównanie godzinowych wartości zmierzonych z obliczeniowymi (8-17 luty 2010), przy uwzględnieniu stałej temperatury wewnętrznej (20°C) w pomieszczeniu testowym.

Analizując wyniki z Rys. 6-6 można stwierdzić, iż jedynie model 3 jest w stanie odzwierciedlić przerwę nocną w ogrzewaniu oraz szybką fazę nagrzewania się po tej przerwie, gdyż tylko on uwzględnia akumulację ciepła w przegrodach zewnętrznych pomieszczenia testowego.

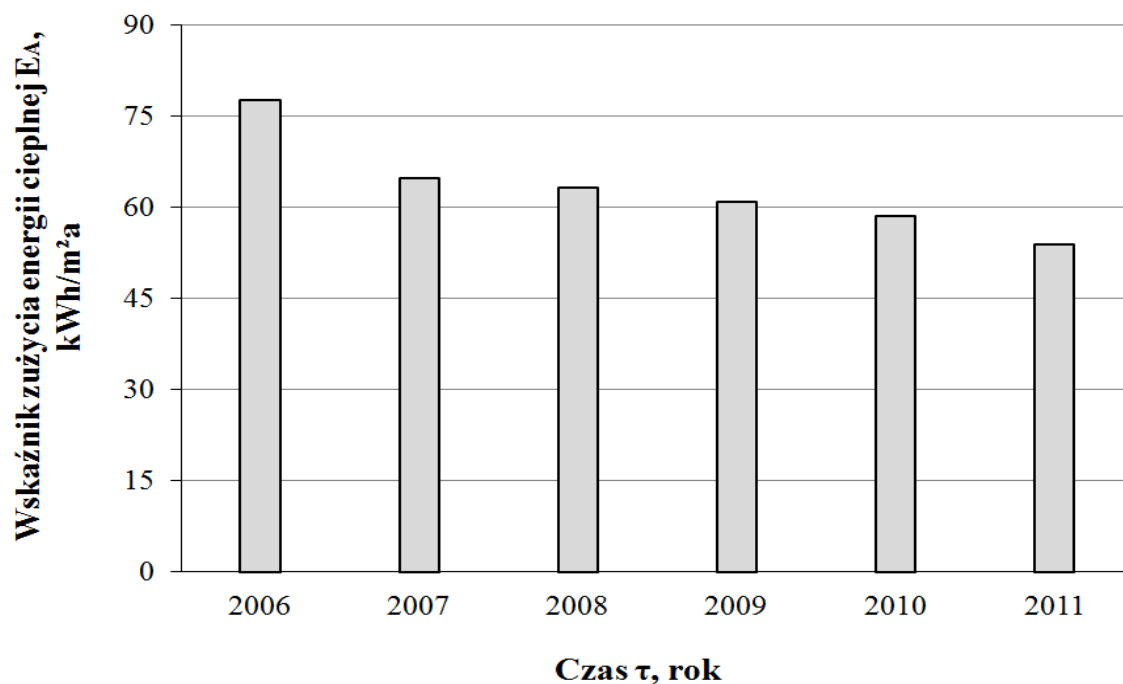
## 6.2 Obiekt testowy

Monitoring zużycia energii cieplnej obiektu testowego dostarczył danych pomiarowych w różnych skalach czasowych (godzina, dzień, miesiąc, rok). Dane te posłużyły do weryfikacji modeli symulacyjnych w warunkach rzeczywistych. Rys. 6-7 pokazuje zestawienie miesięcznych wartości zużycia energii cieplnej dla obiektu testowego, od momentu przyłączenia go do sieci grzewczej osiedla SHP. Do lipca 2007 roku, monitoring tego obiektu odbywał się poprzez manualny odczyt miesięcznych wartości zużycia energii cieplnej bezpośrednio z licznika energii cieplnej. Z uwagi na to, że do weryfikacji modeli potrzebne były dokładniejsze dane (godzinowe, dzienne), manualny monitoring zastąpiono w kwietniu 2008 roku automatycznym, opisanym szczegółowo w rozdziale 5.5.2. Proces instalacji nowego systemu monitoringu potrwał kilka miesięcy, co spowodowało lukę w danych zużycia energii cieplnej dla okresu czasu od lipca '07 do kwietnia '08, zaznaczonej na rysunku poniżej.



Rys. 6-7: Miesięczne wartości zużycia energii cieplnej dla obiektu testowego dla lat od 2006-2011.

Jak wynika z Rys. 6-7, tylko w pierwszych miesiącach eksploatacji omawianego obiektu testowego, wartości zużycia energii cieplnej są nieco wyższe niż w przypadku pozostałych miesięcy. Wpływa to na wyższą wartość zużycia energii cieplnej dla pierwszego roku eksploatacji tego obiektu, w porównaniu do kolejnych lat (Rys. 6-8). Wartość ta prawdopodobnie wynika z faktu, iż w pierwszym roku eksploatacji obiektów osiedla SHP, ściany ich są mokre, czy też wychłodzone i dlatego obiekty te zużywają więcej energii cieplnej, niż w kolejnych latach ich eksploatacji. Ma to również spory wpływ na eksploatację całej sieci grzewczej osiedla SHP. W przypadku osiedla SHP, którego rozbudowa odbywa się przez cały czas, wyższe zapotrzebowanie na energię cieplną związane z przyłączaniem nowych odbiorców do sieci ma istotny wpływ na eksploatację całej sieci grzewczej.

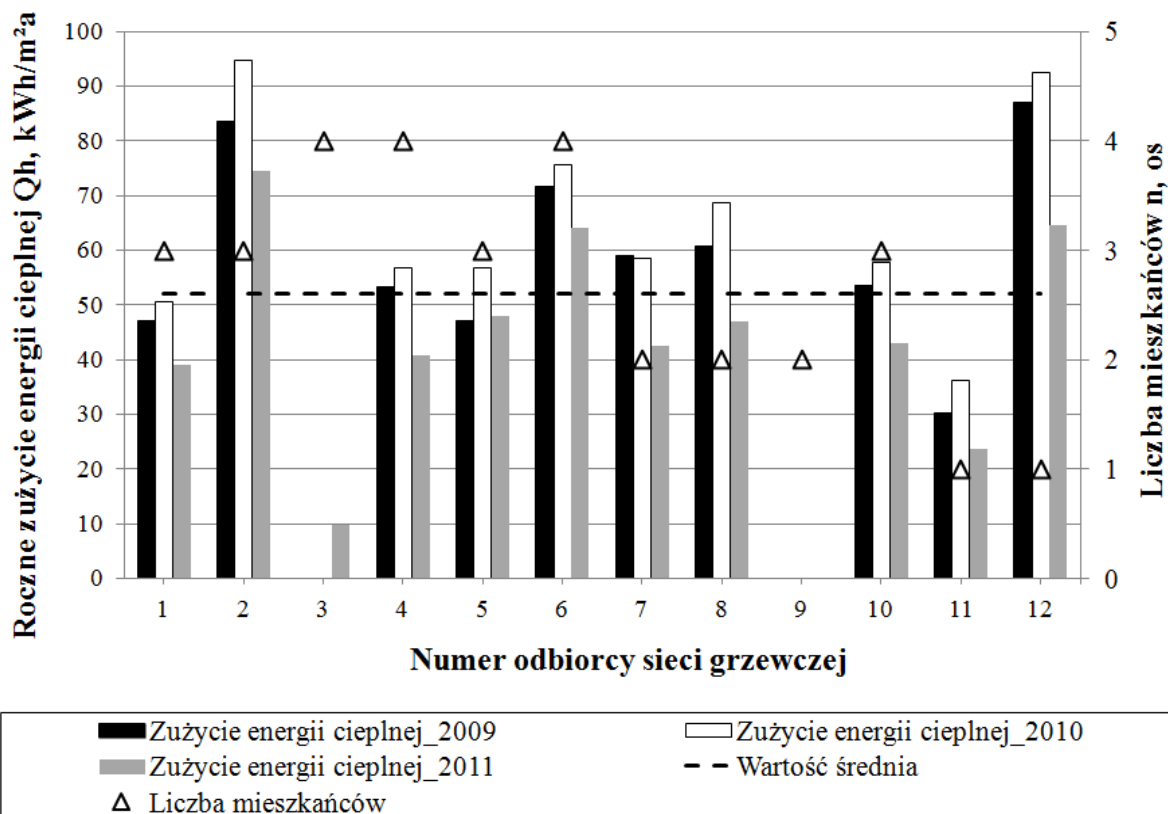


Rys. 6-8: Wartości wskaźnika zużycia energii cieplnej  $E_A$  dla obiektu testowego.

Analizując Rys. 6-8, wartości dla lat 2006 i 2007 są wartościami odczytanymi manualnie, natomiast wartości dla lat od 2008 do 2011, pochodzą z automatycznego monitoringu. Średnia wartość wskaźnika  $E_A$  dla lat od 2007-2011 wynosi 54,2 kWh/m<sup>2</sup>a. Rok 2006 nie został włączony do wyznaczenia średniej, z uwagi na to, iż jest to pierwszy rok eksploatacji obiektu. W roku tym, ściany obiektu są jeszcze mokre, więc duża część energii cieplnej została wykorzystana do ich suszenia, co objawiło się powiększonym wskaźnikiem  $E_A$ .

Jak już wspomniano w rozdziale 5.5.2, omawiany obiekt testowy składa się z 12 podobiektów, których godzinowe wartości zużycia energii cieplnej monitorowane są od kwietnia 2008 roku, oddzielnie dla każdego z nich. Roczne wartości zużycia energii cieplnej wraz z liczbą mieszkańców dla poszczególnych podobiektów omawianego obiektu testowego, zestawione zostały na Rys. 6-9, oddzielnie dla lat od 2009-2011.

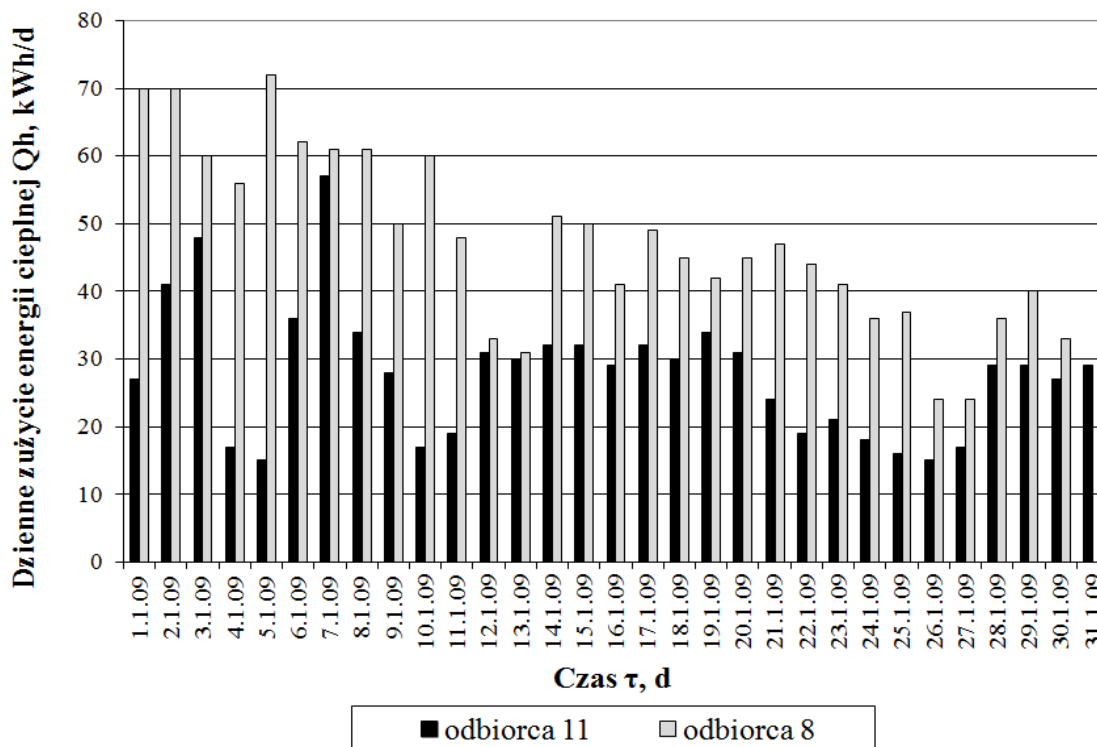




Rys. 6-9: Roczne wartości zużycia energii cieplnej i liczby mieszkańców dla poszczególnych podobiektów obiektu testowego.

Rys. 6-9 uwidacznia duże różnice w zużyciu energii cieplnej poszczególnych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, które w przypadku niektórych z nich bardzo odbiegają od wartości średniej (przerywana linia). Z uwagi na to, że odbiorcy ci mają niemalże identyczną charakterystykę energetyczną, różnice te można wytłumaczyć jedynie różnymi zachowaniami użytkowników. Liczba mieszkańców, jak widać na rysunku powyżej, nie odgrywa większej roli. W przypadku mieszkań z numerami 3 i 9 nie było możliwe przeprowadzenie pomiarów, co miało związek z awarią liczników energii.

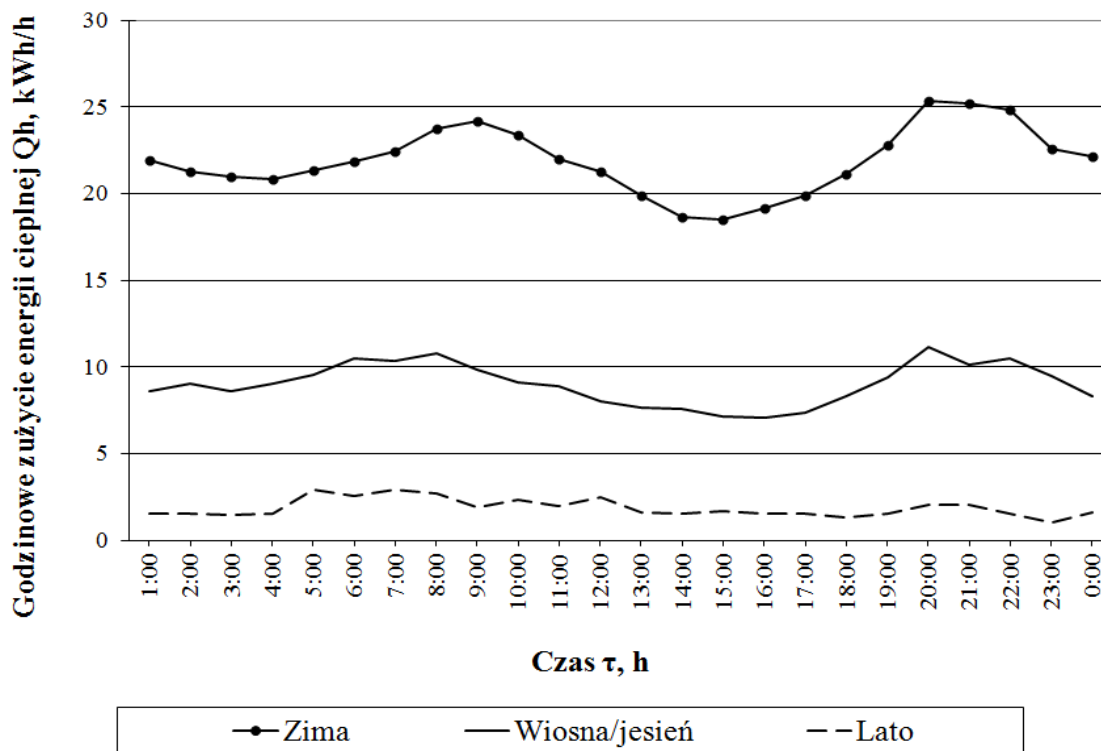
Dla przykładu, Rys. 6-10 przedstawia dobowe wartości zużycia energii cieplnej dla stycznia 2009 roku, dla dwóch bardzo podobnych do siebie, pod względem charakterystyki energetycznej i umiejscowienia w obiekcie testowym, odbiorców.



Rys. 6-10: Dobowe zużycie energii cieplnej dwóch podobnych podobiektów obiektu testowego dla stycznia 2009 roku.

Dane przedstawione na Rys. 6-10 wskazują więc na istotne znaczenie zachowań użytkowników na zużycie/zapotrzebowanie na energię ciepłą sieci grzewczych osiedli miejskich. Wg Bohma i Daniga [6], monitoring poszczególnych odbiorców sieci grzewczej ma głównie na celu redukcję zużycia energii cieplnej poprzez wpływ na zmianę zachowań użytkowników. Studia literaturowe [6], [73] wykazują, że użytkownicy zmieniają sposób swojego zachowania, gdy ich zużycie energii cieplnej jest monitorowane indywidualnie. Jest to spowodowane faktem, iż indywidualny monitoring zachęca użytkowników do oszczędzania energii. Dobór optymalnej konfiguracji sterowania adaptacyjnego może przyczynić się do redukcji zużycia energii cieplnej, a co za tym idzie kosztów zużycia energii dla bardzo wielu odbiorców energii cieplnej.

Zestawienia danych dla obiektu testowego, przedstawione na powyższych rysunkach, dotyczą wartości dobowych, miesięcznych i rocznych zużycia energii cieplnej. Rys. 6-11 przedstawia uśrednione przebiegi godzinowych wartości zużycia energii cieplnej dla roku 2009 dla całego obiektu testowego z podziałem na pory roku.

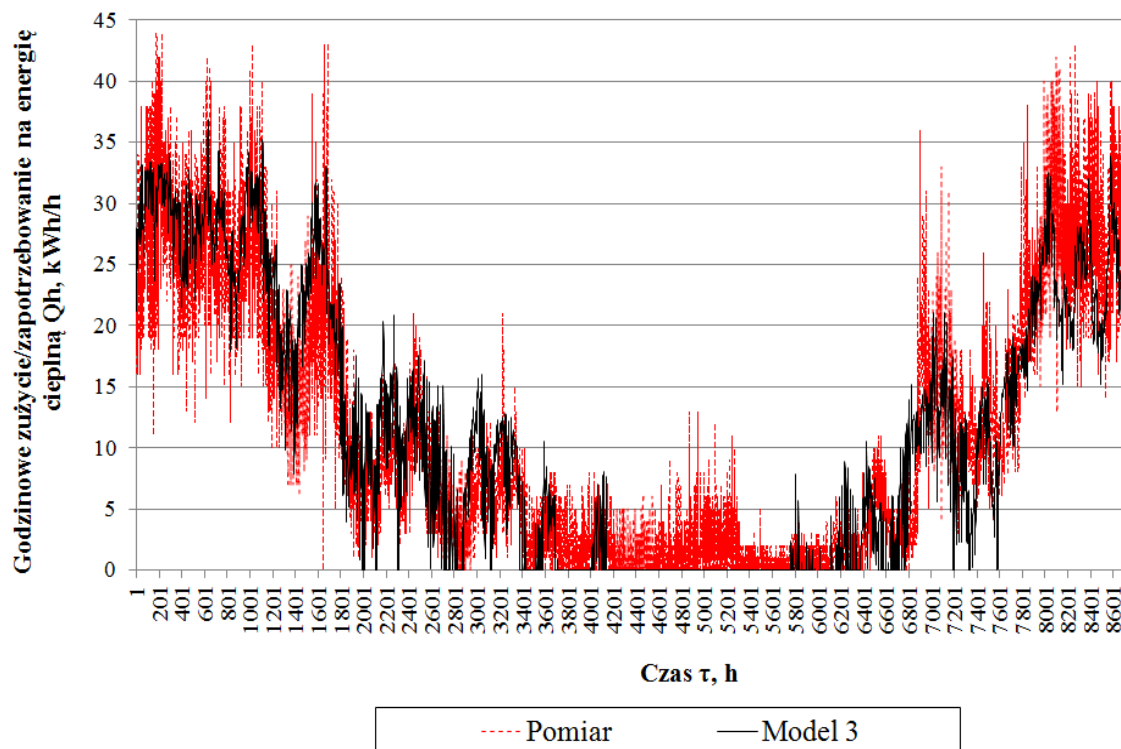


Rys. 6-11: Uśrednione godzinowe przebiegi zużycia energii cieplnej z podziałem na pory roku dla obiektu testowego dla roku 2009.

Powyższy rysunek przedstawia zmienność zużycia, a co za tym idzie zapotrzebowania na energię ciepłą w zależności nie tylko od pory roku, ale i pory dnia. Przebiegi te wykazują charakterystyczny sinusoidalny kształt, w którym wyszczególnić można spadające wartości w porze nocnej i w czasie godzin pracy i amplitudy w godzinach porannych i wieczornych. Tu z kolei możemy wyznaczyć maksymalne zużycie energii cieplnej tego odbiorcy sieci grzewczej osiedla SHP, które ma miejsce w godzinach 8:00 i 20:00. Dobowa zmienność przebiegu zapotrzebowania na energię ciepłą ma istotny wpływ na efektywność eksploatacji sieci grzewczej analizowanego osiedla.

### 6.2.1 Weryfikacja w skali jednej godziny

W celu weryfikacji modeli symulacyjnych wykorzystanych w niniejszej pracy w warunkach rzeczywistych, w pierwszej kolejności dokonano porównania godzinowych wartości pomiarowych z obliczeniowymi dla całego obiektu testowego. Obliczeń dokonano przy użyciu wszystkich 3 modeli, wykorzystując realne godzinowe wartości pogodowe, jak temperatura zewnętrzna i natężenie promieniowania słonecznego. Na Rys. 6-12 pokazano porównanie godzinowych wartości pomiarowych z obliczeniowymi przy użyciu modelu 3.



Rys. 6-12: Porównanie godzinowych wartości zmierzonych z obliczeniowymi (model 3) dla całego obiektu testowego w roku 2010.

Analizując powyższy rysunek, zauważalna jest stosunkowo dobra korelacja pomiędzy godzinowymi wartościami obliczeniowymi a zmierzonymi, szczególnie w miesiącach zimowych.

W kolejnym kroku, dla każdej z procedur wyznaczono odchyłki względne  $\delta$  [%] pomiędzy obliczoną a zmierzoną godzinową wartością zużycia/zapotrzebowania na energię cieplną, osobno dla roku 2009 i 2010 wg wzoru:

$$\delta[\%] = \frac{(Q_{zm} - Q_{obl})}{Q_{zm}} * 100 \quad (6-1)$$

Gdzie:

$\delta$  – odchyłka względna [%]

$Q_{zm}$  – wartość pomiarowa zużycia energii cieplnej [kWh]

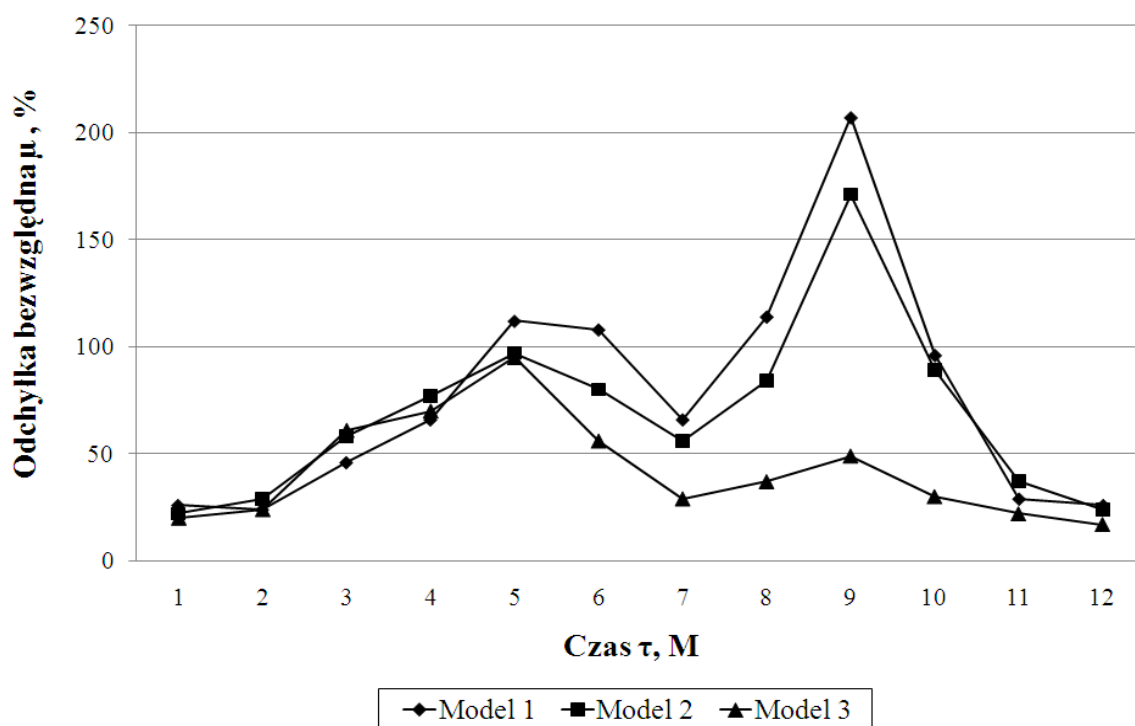
$Q_{obl}$  – wartość obliczona zapotrzebowania na energię cieplną [kWh]

Odchyłki godzinowe (wartości bezwzględne) uśredniono dla każdego miesiąca z osobna i zestawiono w tabeli 6-1:

Tabela 6-1: Odchyłki godzinowe uśrednione dla każdego miesiąca z osobna dla lat 2009 i 2010.

Miesiąc	Błąd bezwzględny $\mu$ , %					
	Model 1		Model 2		Model 3	
	Rok		Rok		Rok	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	26	26	22	22	15	20
2	28	24	26	29	15	24
3	22	46	36	58	21	61
4	105	66	92	77	87	70
5	144	112	110	97	115	95
6	146	108	100	80	85	56
7	70	66	57	56	55	29
8	64	114	55	84	72	37
9	112	207	86	171	61	49
10	69	96	66	89	47	30
11	27	29	39	37	29	22
12	27	26	26	24	20	17

Na Rys. 6-13 zamieszczony został wykres godzinowych odchyłek bezwzględnych uśrednionych dla każdego miesiąca roku 2010 z osobna.

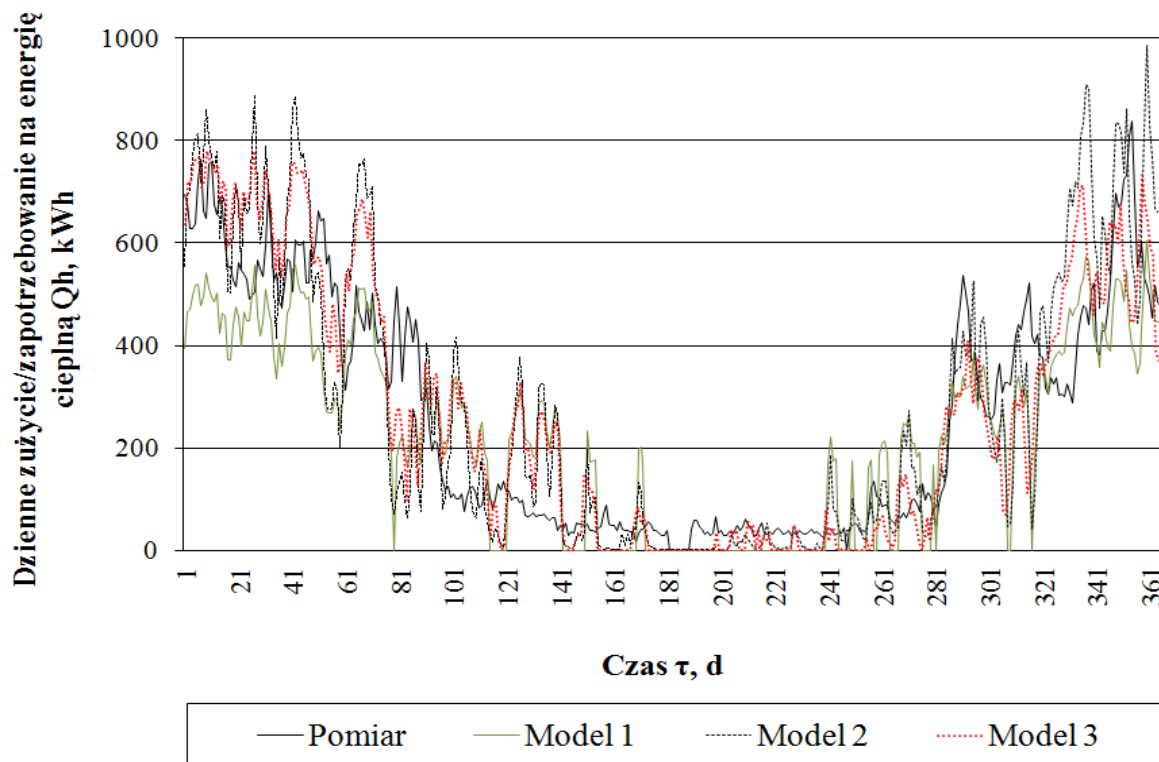


Rys. 6-13: Odchyłki godzinowe pomiędzy wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi z trzech modeli uśrednione dla każdego miesiąca z osobna dla roku 2010.

Jak wynika z rysunku powyżej, model 3 wykazuje największą dokładność obliczonych godzinowych wartości zapotrzebowania na energię cieplną. Ma na to wpływ fakt, iż model ten jest w stanie odzwierciedlić dynamiczny charakter wymiany ciepła w analizowanym obiekcie.

### 6.2.2 Weryfikacja w skali jednego dnia

W kolejnym kroku weryfikacji modeli symulacyjnych, dokonano porównania dobowych wartości pomiarowych z obliczeniowymi dla całego obiektu testowego i dla wszystkich modeli, Rys. 6-14.



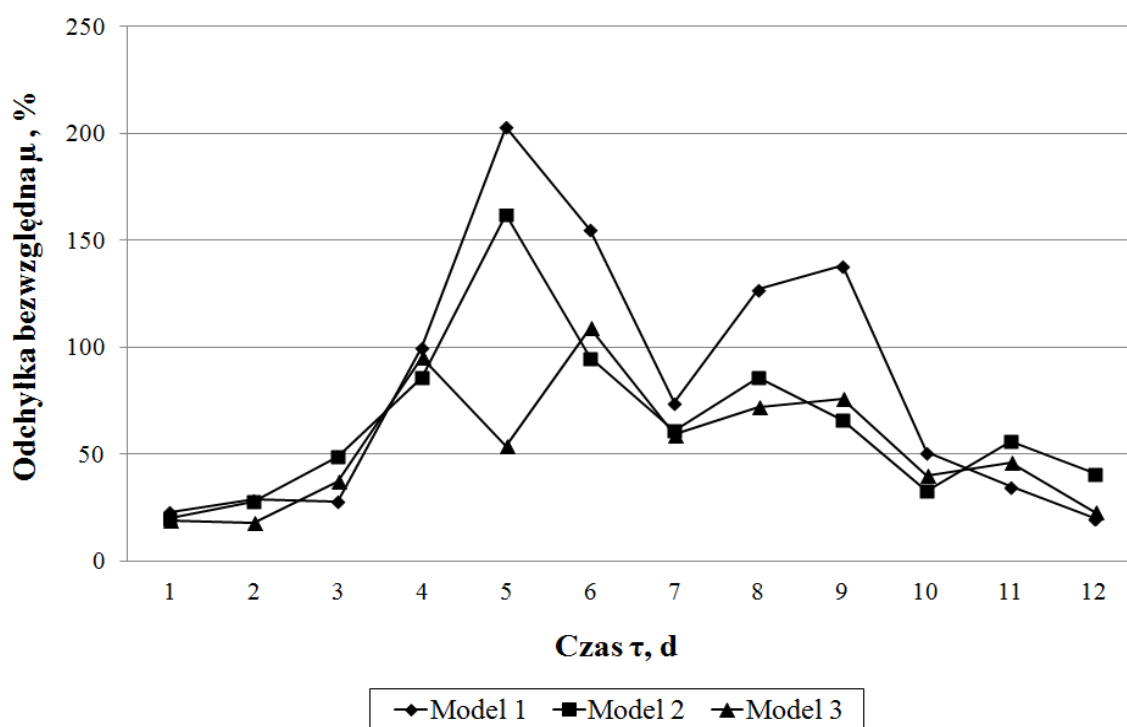
Rys. 6-14: Porównanie dobowych wartości zmierzonych z obliczeniowymi w całym obiekcie testowym w roku 2010.

Jak wynika z Rys. 6-14, zauważalna jest dobra jakościowa korelacja pomiędzy wartościami pomiarowymi a obliczeniowymi w przypadku modelu 2, a szczególnie w przypadku dynamicznego modelu 3. Biorąc pod uwagę model 3, ekstremalne odchyłki, które wystąpiły podczas weryfikacji godzinowej (Rys. 6-12), zostały znacznie zredukowane i tylko w przypadku kilku dni przekraczają 100%. Wartości średniodobowych odchyłek bezwzględnych, uśrednionych dla każdego miesiąca z osobna dla roku 2009 i 2010, zestawione zostały w poniższej tabeli:

Tabela 6-2: Odchyłki dobowe uśrednione dla każdego miesiąca z osobna dla lat 2009 i 2010.

Miesiąc	Błąd bezwzględny $\mu$ , %					
	Model 1		Model 2		Model 3	
	Rok		Rok		Rok	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	26	23	13	20	6	19
2	28	29	12	28	8	18
3	18	28	13	49	12	37
4	78	100	63	86	39	95
5	124	203	55	162	54	54
6	138	155	76	95	68	109
7	76	74	58	61	70	59
8	100	127	84	86	86	72
9	95	138	51	66	72	76
10	48	51	35	33	32	40
11	24	35	21	56	27	46
12	28	20	14	41	17	23

Na Rys. 6-15 zamieszczony został wykres dobowych odchyłek bezwzględnych uśrednionych dla każdego miesiąca roku 2010 z osobna.



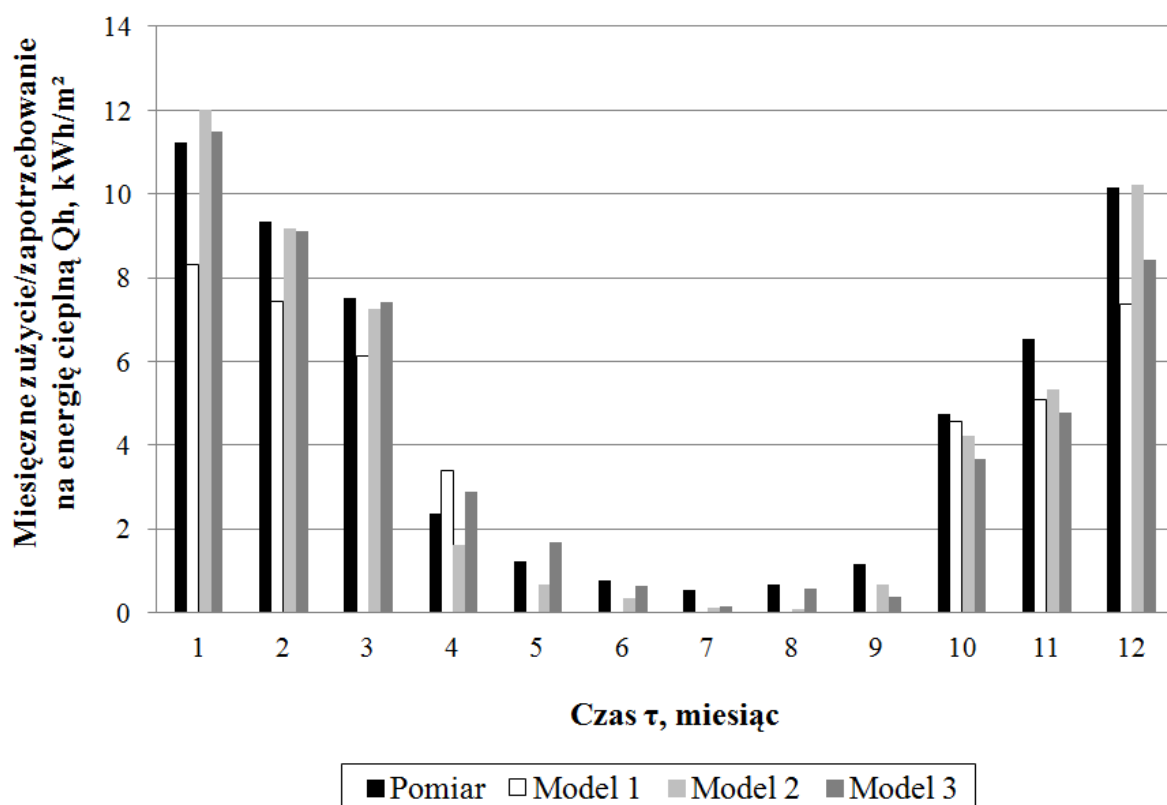
Rys. 6-15: Odchyłki dobowe pomiędzy wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi z trzech modeli uśrednione dla każdego miesiąca z osobna dla roku 2010.

Obliczenia dokonane zostały przy udziale dokładnych danych wejściowych dotyczących geometrii i parametrów cieplnych, takich jak współczynników przenikania ciepła przegród U oraz zmierzonych danych pogodowych (temperatura zewnętrzna i natężenie promieniowania

słonecznego). Pomimo tego, weryfikacja modeli wykazała odchyłki pomiędzy dobowymi wartościami zmierzonymi a obliczeniowymi. Mogą one wynikać z braku uwzględnienia akumulacji ciepła w przegrodach zewnętrznych w przypadku modeli 1 i 2, a także różnych zachowań użytkowników dla wszystkich analizowanych modeli. Jak pokazuje Rys. 6-9, istnieją spore różnice w zużyciu energii cieplnej pomiędzy poszczególnymi odbiorcami ciepła omawianego obiektu testowego.

### 6.2.3 Weryfikacja w skali miesięcznej

Weryfikacja modeli w skali miesięcznej wykazuje dobrą zgodność pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczeniowymi, szczególnie w przypadku modeli 2 i 3, co przedstawiono na Rys. 6-16.



Rys. 6-16: Porównanie miesięcznych wartości pomiarowych z obliczeniowymi w roku 2009.

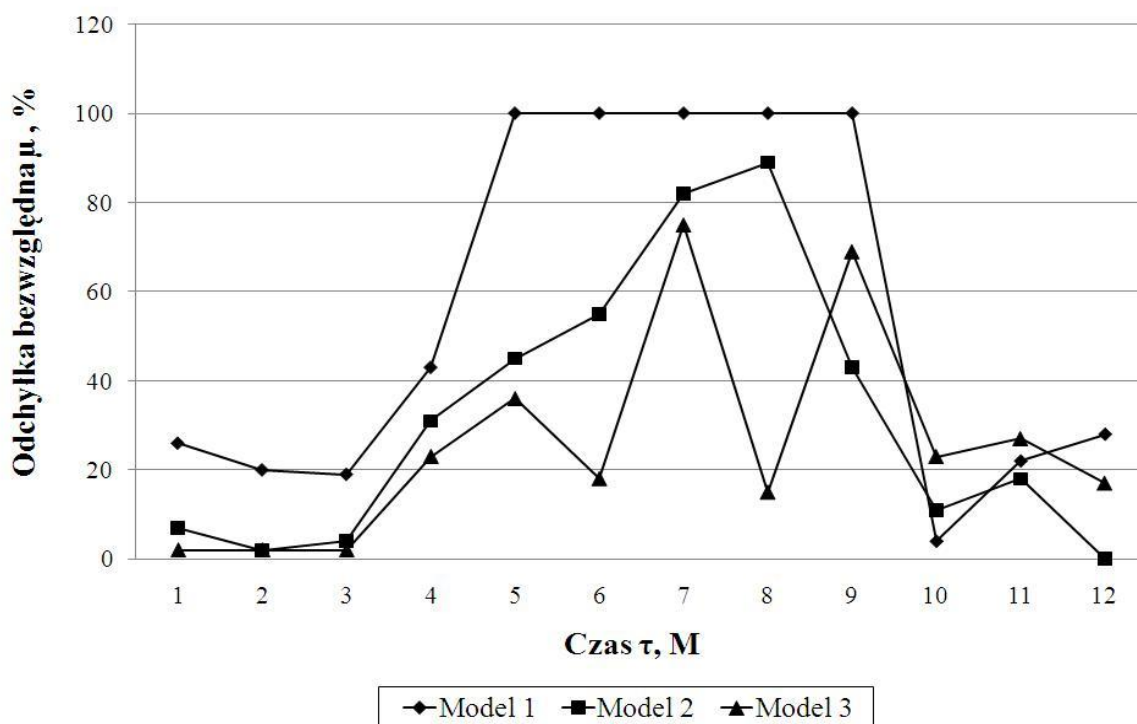
Miesięczne odchyłki bezwzględne wyznaczone są oddzielnie dla każdego modelu, a wartości zestawione w tabeli 6-3:



Tabela 6-3: Odchyłki miesięczne pomiędzy wartościami obliczeniowymi a zmierzonymi dla lat 2009 i 2010.

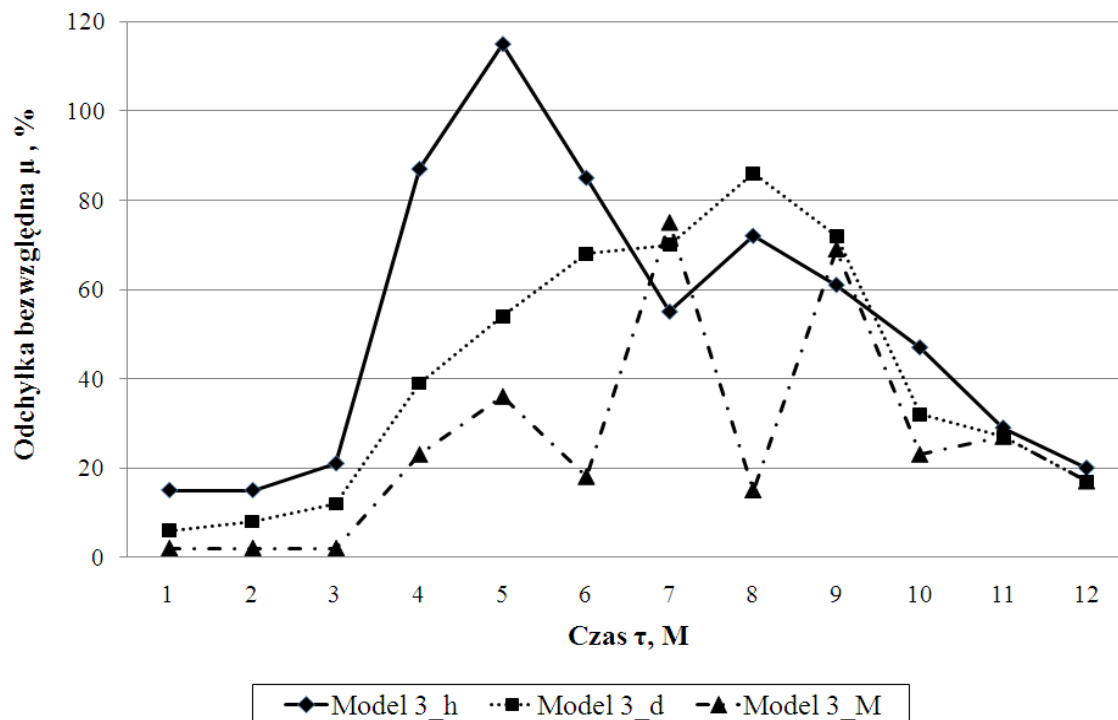
Miesiąc	Błąd bezwzględny $\mu$ , %					
	Model 1		Model 2		Model 3	
	Rok		Rok		Rok	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	26	28	7	6	2	11
2	20	12	2	10	2	11
3	19	2	4	21	2	21
4	43	32	31	1	23	11
5	100	81	45	33	36	31
6	100	100	55	66	18	55
7	100	100	82	81	75	75
8	100	100	89	24	15	45
9	100	257	43	81	69	27
10	4	11	11	9	23	9
11	22	11	18	5	27	8
12	28	26	0	9	17	12

Na Rys. 6-17 zamieszczony został wykres miesięcznych odchyłek bezwzględnych uśrednionych dla każdego miesiąca roku 2009.



Rys. 6-17: Odchyłki miesięczne pomiędzy wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi z trzech modeli dla roku 2009.

Z kolei Rys. 6-18 pokazuje na przykładzie modelu 3, jak skala czasowa (godzina, dzień, miesiąc) wpływa na zgodność wyników obliczeniowych z pomiarowymi.



Rys. 6-18: Odchyłki godzinowe, dobowe i miesięczne pomiędzy wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi z modelu 3 dla roku 2009.

Jak wynika z rysunku powyżej, potwierdza się, iż skala czasowa ma wpływ na dokładność wyników obliczeniowych. Generalnie zauważyć można, iż wraz ze wzrostem skali czasowej (godzina, dzień, miesiąc) dokładność wyników wzrasta. Jedynie w przypadku miesięcy letnich zależność ta zostaje zaburzona.

#### 6.2.4 Weryfikacja w skali sezonu grzewczego

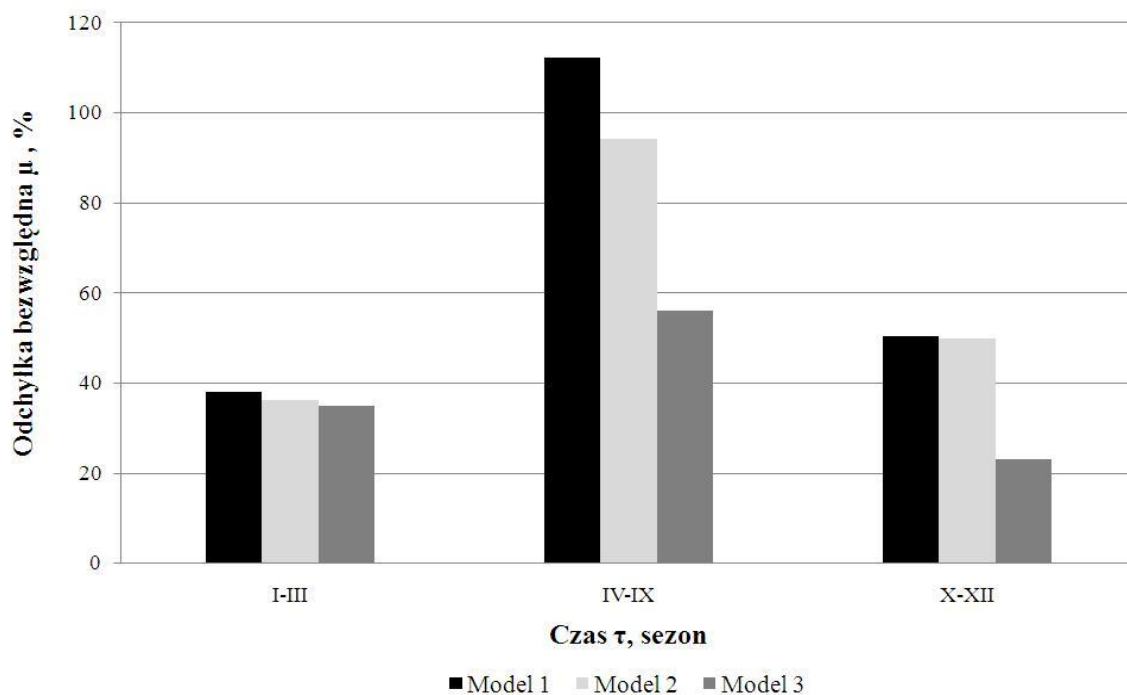
W kolejnym kroku analizy wpływu dokładności skali czasowej na wyniki obliczeń, wartości miesięczne zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą zsumowano dla poszczególnych sezonów rocznych i zestawiono w tabeli 6-4.

Tabela 6-4: Porównanie wartości pomiarowych i obliczeniowych zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą dla obiektu testowego w skali sezonowości w oparciu o wartości miesięczne (2009, 2010)

Typ modelu	Model 1			Model 2			Model 3		
	I – III	IV – IX	X – XII	I – III	IV – IX	X – XII	I – III	IV – IX	X – XII
Błąd bezwzględny $\mu$ , % (rok 2009)	22	50	21	1	48	8	0	7	21
Błąd bezwzględny $\mu$ , % (rok 2010)	16	40	14	1	4	8	13	4	10

Jak wynika z powyższej tabeli, szczególnie w przypadku modelu 2 i 3, niezależnie od pory roku, odchyłki pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczeniowymi leżą w granicach 10%. W przypadku wyników z modelu 1, odchyłki te są o wiele wyższe.

Na Rys. 6-19 zamieszczony został wykres godzinowych odchyłek bezwzględnych uśrednionych dla każdego miesiąca roku 2010 z osobna.



Rys. 6-19: Odchyłki sezonowe pomiędzy wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi z trzech modeli dla roku 2010.

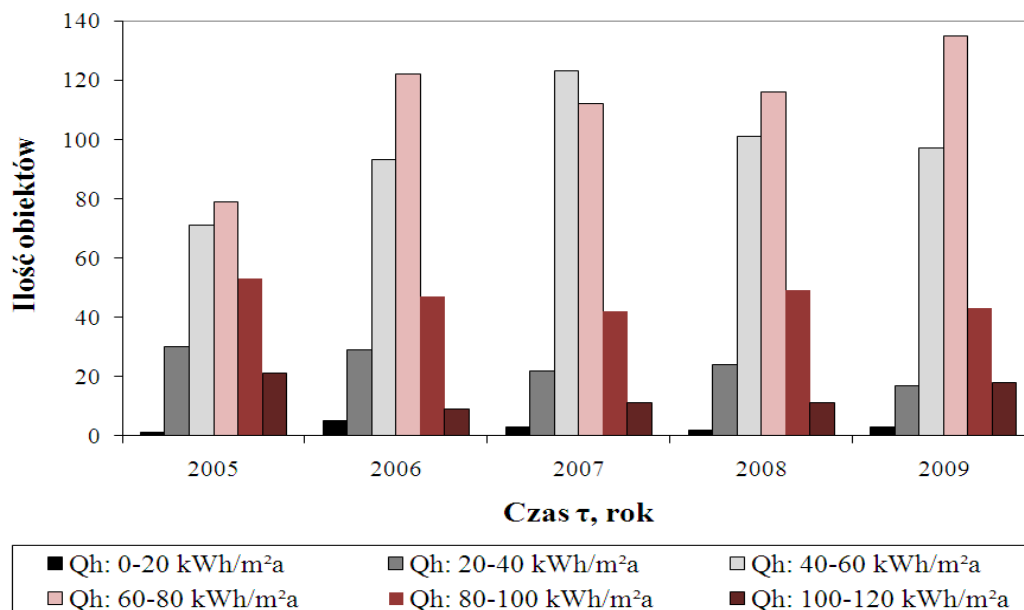
## 6.3 Cała sieć grzewcza osiedla SHP

### 6.3.1 Analiza danych z monitoringu osiedla SHP

Roczne wartości zużycia energii cieplnej dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP udostępnione zostały przez dostawcę energii osiedla SHP, ciepłownię miejską Esslingen. Jak już wcześniej wspomniano, obiekty mieszkalne osiedla SHP podzielone zostały na 2 duże grupy:

- 1) obiekty wielorodzinne
- 2) obiekty szeregowe, jedno- i dwurodzinne

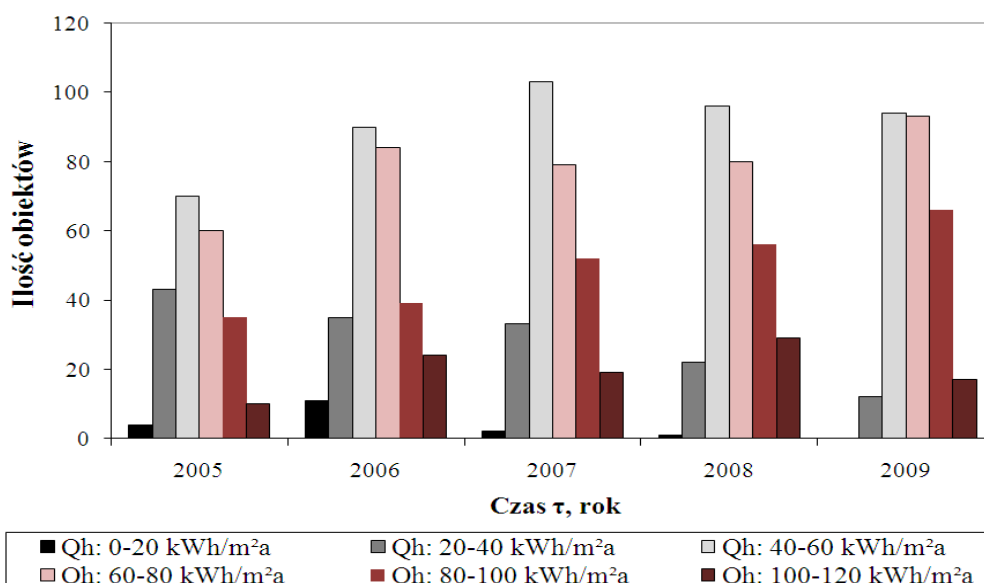
Rozkłady rocznych wartości zużycia energii cieplnej dla lat 2005-2009 dla pierwszej grupy odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, zestawione zostały na Rys. 6-20.



Rys. 6-20: Rozkład rocznego zużycia energii cieplnej dla odbiorców sieci grzewczej z grupy 1.

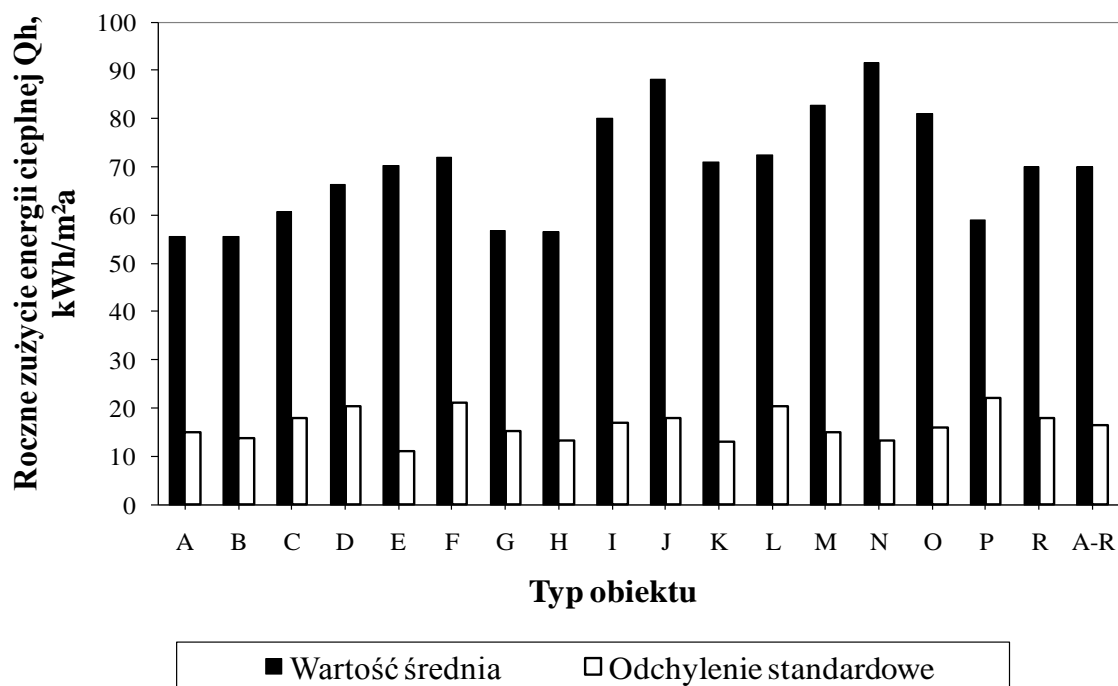
Jak wynika z Rys. 6-20, poziom zużycia energii cieplnej leży w przypadku większości obiektów mieszkalnych z grupy 1 w przedziale 40-80 kWh/m<sup>2</sup>a. Istnieją jednak odbiorcy sieci grzewczej (ok. 100), których zużycie energii cieplnej znacznie przekracza ten przedział wartości. Z uwagi na to, że obiekty te powinny należeć do energooszczędnych, wartości te są stanowczo za wysokie.

Analizując drugą grupę odbiorców sieci grzewczej analizowanego osiedla (obiekty mieszkalne szeregowe, jedno- i dwurodzinne), widoczną na Rys. 6-21, rozkład rocznych wartości zużycia energii cieplnej wygląda bardzo podobnie.



Rys. 6-21: Rozkład rocznego zużycia energii cieplnej dla odbiorców sieci grzewczej z grupy 2.

W kolejnym kroku wykluczono z grupy 2 odbiorców sieci grzewczej o skrajnym zużyciu energii cieplnej (przedziały 0-20 kWh/m<sup>2</sup>a i 100-120 kWh/m<sup>2</sup>a z Rys. 6-21), a pozostałych odbiorców podzielono na mniejsze grupy w zależności od ich budowy i charakterystyki energetycznej. Dla każdej z nowo wyznaczonych grup, zawierających od 5 do 35 obiektów i oznaczonych literami od A-R, wyznaczono wartość średnią rocznego zużycia energii cieplnej oraz obliczono odchylenie standardowe od tej wartości (Rys. 6-22).

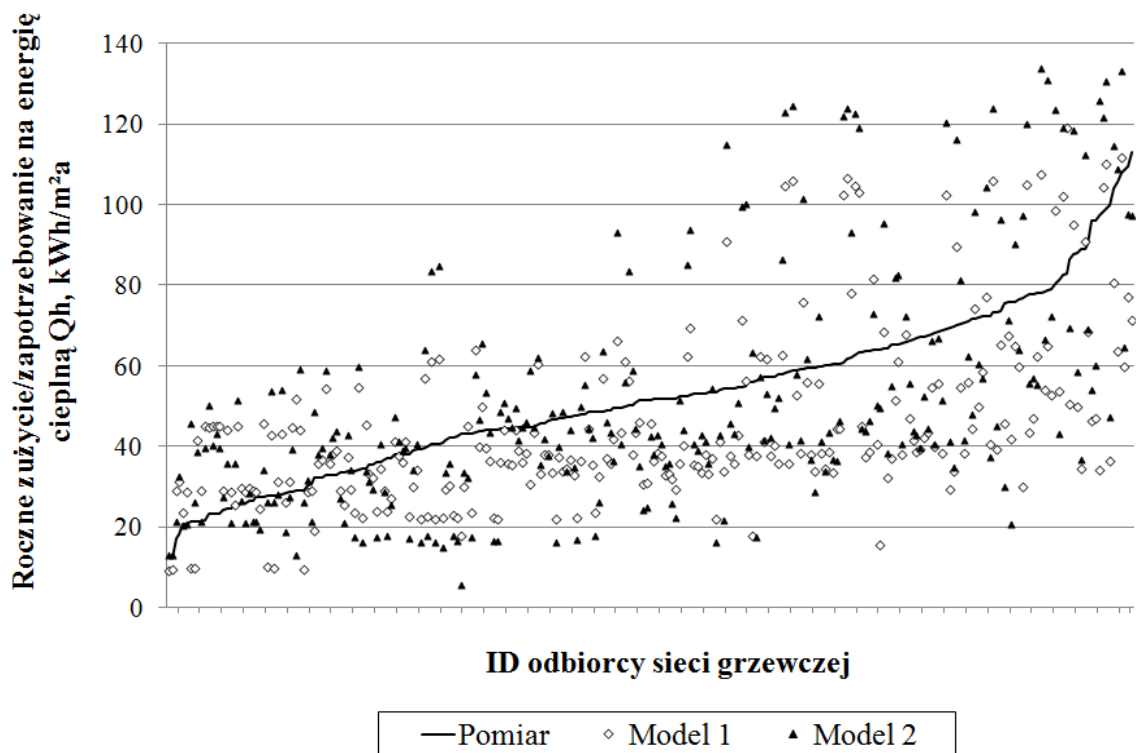


Rys. 6-22: Uśrednione roczne wartości zużycia energii cieplnej dla typów obiektów od A do R dla roku 2009.

Teoretycznie, obiekty należące do tego samego typu powinny posiadać podobne wartości zużycia energii cieplnej. W rzeczywistości jednak, jak wynika z Rys. 6-22, występują spore różnice w rocznym zużyciu energii cieplnej pomiędzy poszczególnymi obiektami należącymi do tego samego typu. Średnie wartości dla poszczególnych typów leżą w przedziale od 55-90 kWh/m<sup>2</sup>a, a ich standardowe odchylenie dochodzi nawet do 20%. Fakt ten może wskazywać na wpływ zachowań użytkowników na zużycie energii cieplnej.

### 6.3.2 Weryfikacja modeli symulacyjnych

Z uwagi na strukturę osiedla SHP, analiza zapotrzebowania na energię cieplną całej jego sieci przeprowadzona została, jak wspomniano wyżej, dla 2 głównych grup odbiorców tej sieci. Analizując pierwszą grupę odbiorców (obiekty wielorodzinne), ich roczne wartości zużycia energii cieplnej porównano na Rys. 6-23 z wartościami obliczeniowymi z obu modeli symulacyjnych. Wykres ten jest wykresem uporządkowanym według wartości pomiarowych od najmniejszej do największej.

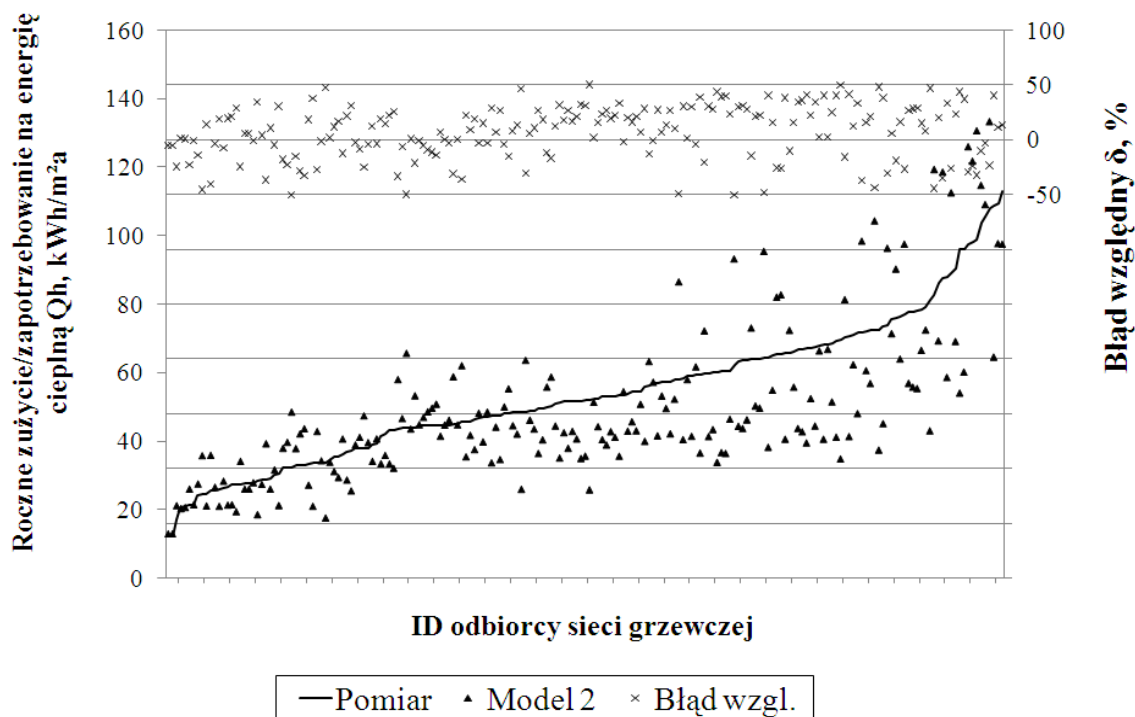


Rys. 6-23: Wykres uporządkowany rocznych wartości zmierzonych i obliczeniowych dla 265 obiektów z grupy 1 odbiorców sieci grzewczej.

Jak wynika z Rys. 6-23, w przypadku obiektów o mniejszym zużyciu energii cieplnej (< 60 kWh/m<sup>2</sup>a), zauważalna jest dobra zgodność pomiędzy wartościami obliczeniowymi a zmierzonymi. W przypadku pozostałych obiektów, odchyłki te są spore, mogą w skrajnych przypadkach przekroczyć 100%. Te ekstremalne różnice powodują stosunkowo wysoką wartość średniej odchyłki dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej omawianej grupy, wynoszącą ok. 35-40% dla obu modeli.

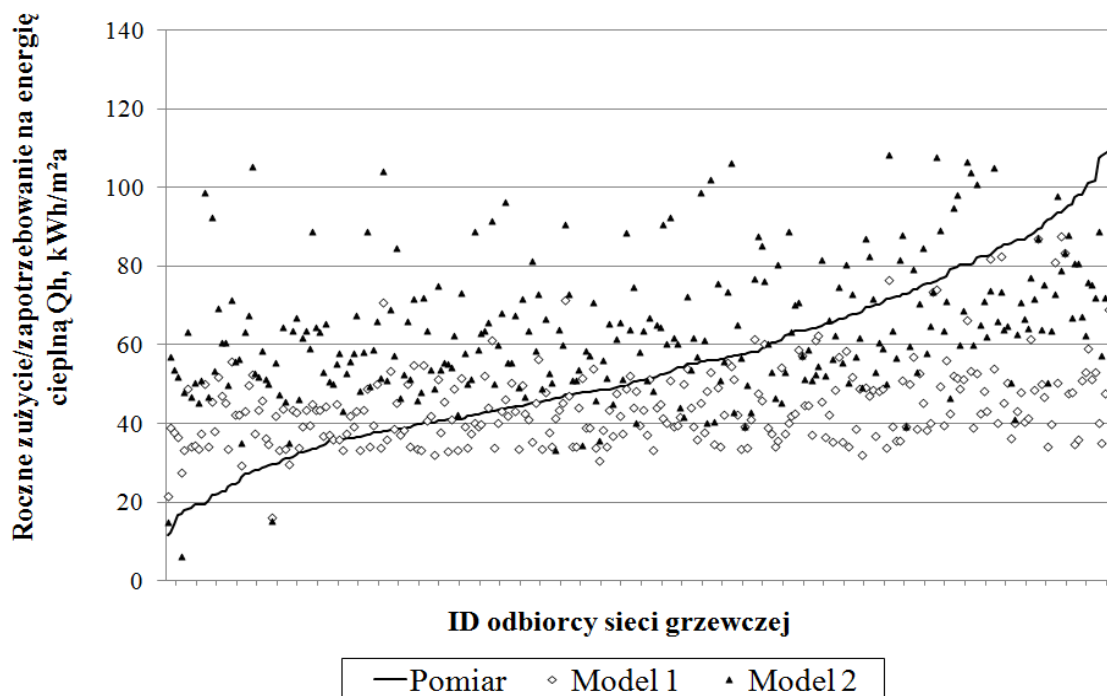
Wysokie odchyłki mogły być także spowodowane np. brakiem dostępności danych geometrycznych (wysokości obiektu) dla wielu obiektów osiedla SHP. Dane ze skaningu laserowego dostępne były jedynie dla obiektów osiedla SHP, które powstały przed rokiem 2002. W wyniku potrzeby automatyzacji procesu prognozowania zapotrzebowania na ciepło grzewcze sieci grzewczej całego osiedla, dla obiektów, dla których informacja o ich wysokości nie była znana (obiekty zbudowane po roku 2002) przyjęto wartość minimalną równą 7,5 m dla obiektów o dwóch kondygnacjach. Wskazuje to na istotność dysponowania dokładnymi danymi wejściowymi w celu uzyskania dobrej zgodności pomiędzy wartościami obliczeniowymi a pomiarowymi.

Kolejne zestawienie (Rys. 6-24) uwzględnia jedynie tych odbiorców (75% ze wszystkich), dla których odchyłka w przypadku modelu 2 nie przekracza +/- 50%. Średnia wartość odchyłki w tym przypadku leży na poziomie 26%.



Rys. 6-24: Skorygowany wykres uporządkowany rocznych wartości zmierzonych i obliczeniowych (model 2) dla 197 odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP z grupy 1.

Porównanie rocznych wartości obliczeniowych ze zmierzonymi dla grupy 2 odbiorców (domy szeregowe, jedno- i dwurodzinne) sieci grzewczej pokazane jest na Rys. 6-25.

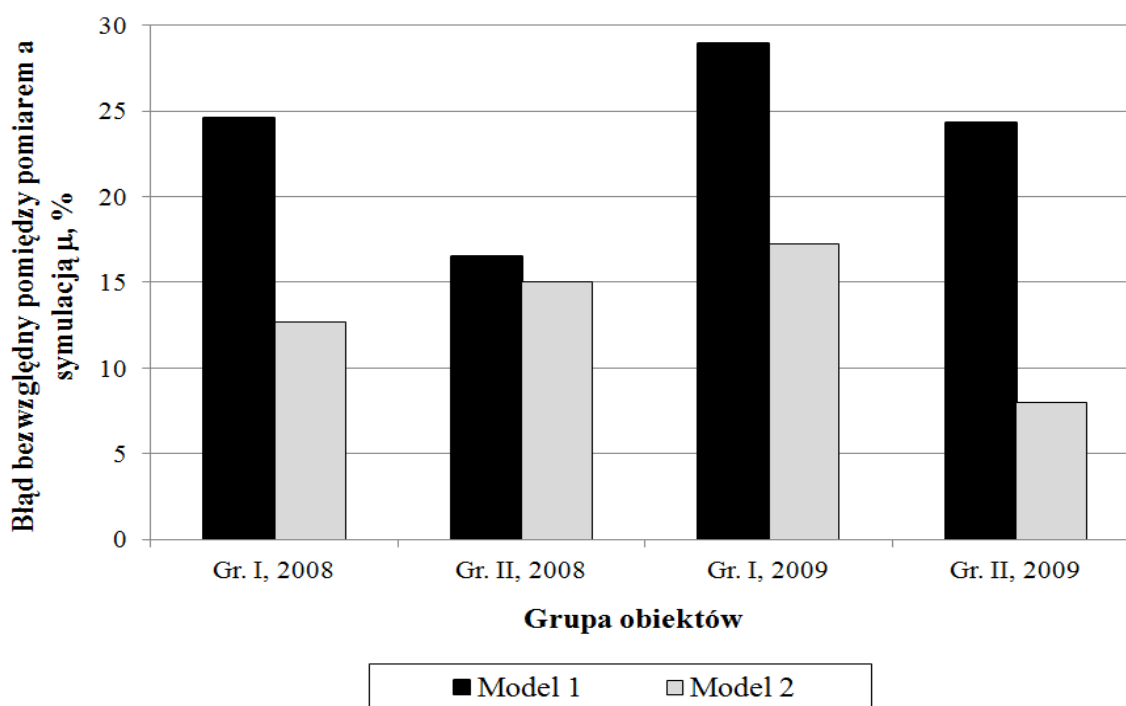


Rys. 6-25: Wykres uporządkowany rocznych wartości zmierzonych i obliczeniowych (model 1 i 2) dla 282 odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP z grupy 2.

Porównanie rocznych wartości zużycia energii cieplnej z jej zapotrzebowaniem w przypadku 2-giej grupy odbiorców sieci grzewczej również wykazało dużą ilość znacznych odchyłek. To z kolei doprowadziło do stosunkowo wysokiej średniej wartości odchyłki pomiędzy wartościami obliczeniowymi a zmierzonymi, a mianowicie powyżej 30% dla obu modeli. Rys. 6-25 pokazuje sporą rozbieżność pomiędzy najmniejszą a największą wartością zużycia energii cieplnej. Biorąc pod uwagę fakt, że parametry cieplne tych obiektów, jak wartości U są niemalże identyczne, na taki przebieg mogą mieć wpływ różne zachowania użytkowników.

W poprzednich punktach niniejszej pracy dokonano weryfikacji modeli symulacyjnych w oparciu o różne skale dotyczące ilości analizowanych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP. Weryfikację rozpoczęto od analizy pomieszczenia testowego, w następnym kroku sprawdzono dokładność modeli symulacyjnych w oparciu o jeden obiekt rzeczywisty osiedla SHP, tzw. obiekt testowy. Tu również dokonano porównania w zależności od okresu czasu (godzina, dzień, miesiąc, rok).

W kolejnym kroku, analizie poddano nie pojedyncze obiekty z każdej grupy, ale poszczególne grupy potraktowane zostały jako całość. W tym celu, wartości zużycia, jak i zapotrzebowania na energię cieplną dla poszczególnych obiektów zsumowano dla każdej analizowanej grupy z osobna, jak to jest widoczne na Rys. 6-26.

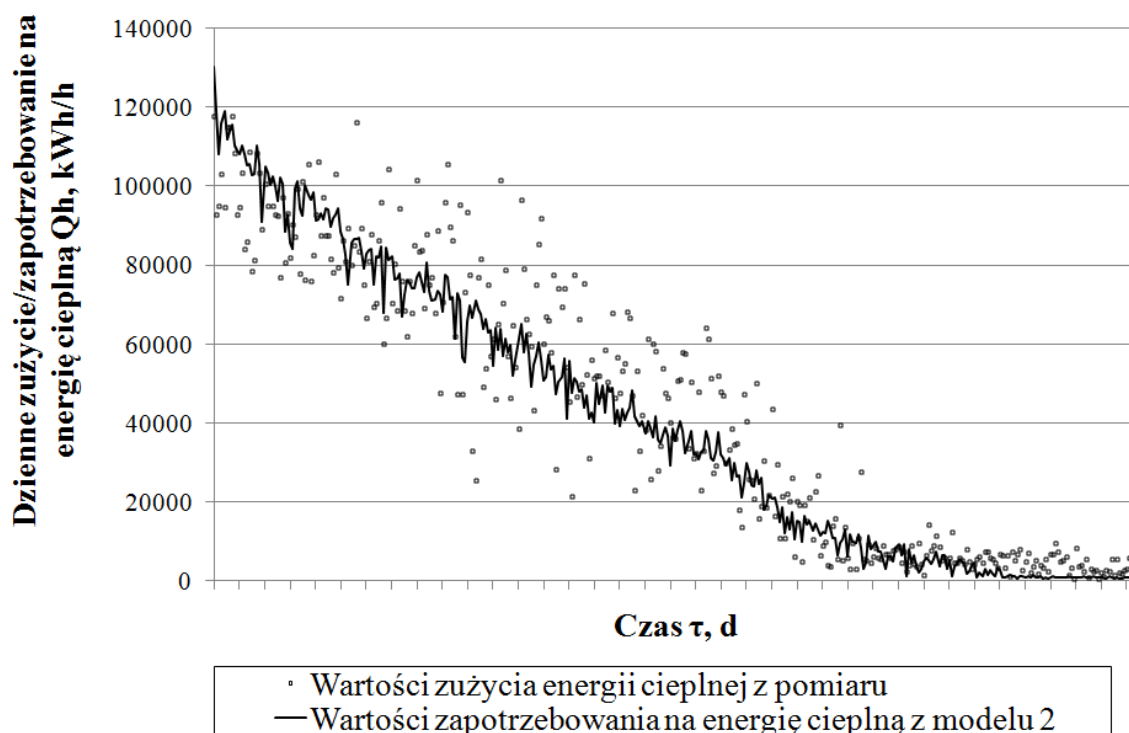


Rys. 6-26: Błędy bezwzględne pomiędzy pomiarem a symulacją dla dwóch grup odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP.

Rys. 6-26 pokazuje odchyłki pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczeniowymi osobno dla roku 2008 i dla 2009, a także osobno dla każdej z omawianych grup analizowanych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP. Porównanie wykazało, iż w przypadku modelu 2 odchyłki te są niższe niż w przypadku modelu 1.



W ostatnim etapie obliczono roczny przebieg zapotrzebowania na energię ciepłą dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP. W tym celu zsumowano po obiektach, godzinowe wartości zapotrzebowania na energię ciepłą, obliczone przy pomocy modelu 2. Przebieg ten porównano z rocznym przebiegiem zużycia energii ciepłej dla całej sieci grzewczej osiedla wyznaczonego przy pomocy pomiaru wykonanego w elektrociepłowni ORC zasilającej tę sieć grzewczą. W celu przejrzystego zobrazowania wyników, godzinowe wartości zsumowano do wartości dziennych i unormowano według malejącego zapotrzebowania na energię ciepłą, jak pokazano na Rys. 6-27.



Rys. 6-27: Unormowany przebieg zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą dla sieci grzewczej osiedla SHP w roku 2009.

Jeśli chodzi o zmierzony przebieg zużycia energii ciepłej dla całej sieci grzewczej osiedla, to zawiera on w sobie tylko ciepło grzewcze; ciepło na przygotowanie ciepłej wody użytkowej oraz straty ciepłe sieci grzewczej zostały wyłączone z porównania. Na Rys. 6-27, zauważalna jest dosyć dobra zgodność pomiędzy stroną zasilającą a odbiorczą sieci grzewczej osiedla SHP, szczególnie w tylnej części przebiegu. Wskazuje to na stosunkowo dużą dokładność wypracowanej metodyki.

## 6.4 Wpływ stopnia szczegółowości danych na wyniki obliczeń zużycia/zapotrzebowania na energię cieplną

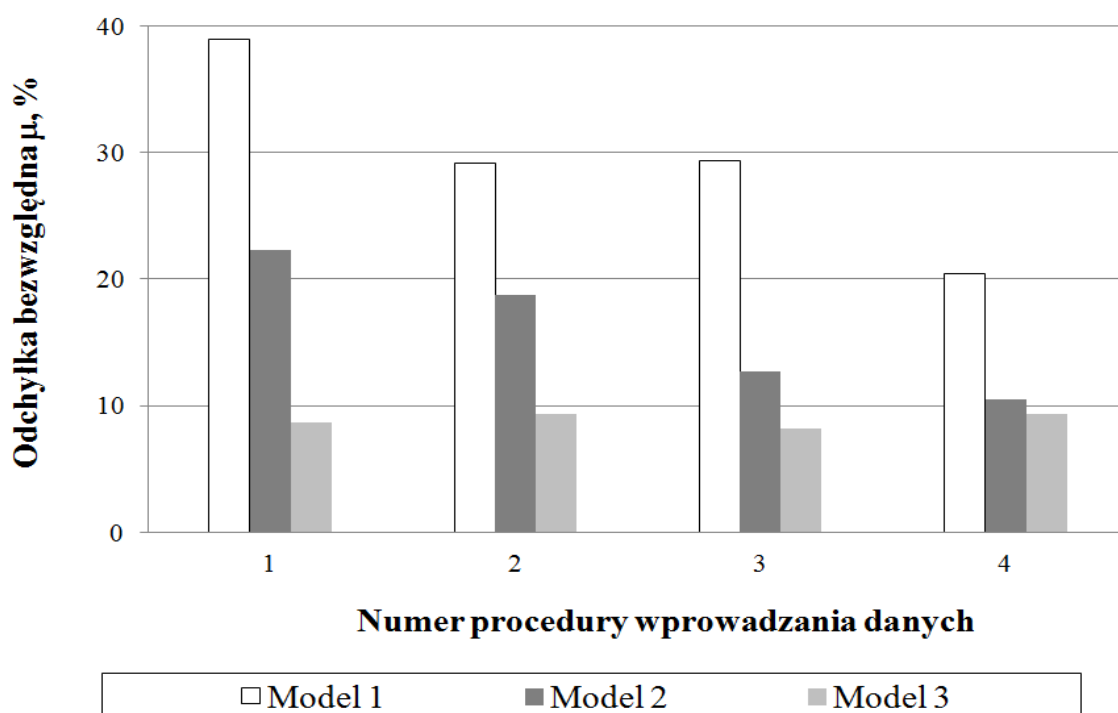
Weryfikacja modeli symulacyjnych w skali roku ma szczególne znaczenie z uwagi na fakt, iż w przypadku wszystkich obiektów osiedla (z wyjątkiem obiektu testowego) dostępne są jedynie roczne wartości zużycia energii cieplnej. Obiekt testowy dodatkowo umożliwił przeprowadzenie rocznej weryfikacji na różnych poziomach szczegółowości wprowadzania danych wejściowych. Jest to możliwe dzięki dostępności danych wejściowych o różnym poziomie szczegółowości (począwszy od bardzo szczegółowych danych z planów i certyfikatów energetycznych, aż po mniej dokładne dane ze skaningu laserowego). Dla przypomnienia, dla pozostałych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP brak jest dostępnych szczegółowych danych geometrycznych i cieplnych; dysponuje się jedynie danymi ze skaningu laserowego.

Obliczenia rocznego zapotrzebowania na energię cieplną dla obiektu testowego dokonano w oparciu o 4 procedury, dotyczące stopnia szczegółowości wprowadzanych danych wejściowych do modeli symulacyjnych. Procedura 1 wykorzystuje mało dokładne geometrie obiektu (powierzchnia rzutu i wysokość obiektu), oraz uśrednione wartości współczynników U dla wszystkich obiektów wielorodzinnych. Procedura 2 jest dokładniejsza od procedury 1, ponieważ geometrie obiektu wyznaczone zostały na podstawie danych z certyfikatu energetycznego. Procedura 3 jest odwrotnością procedury 2, czyli geometrie pochodzą ze skaningu laserowego, tak jak w przypadku procedury 1, natomiast wartości współczynników U pobrane zostały z certyfikatu energetycznego. Procedura 4 należy do najdokładniejszych spośród wszystkich czterech wariantów, ponieważ zawiera ona szczegółowe dane, dotyczące zarówno geometrii, jak i współczynników U. Wartości roczne obliczone według każdej z powyżej opisanych procedur są sumą wartości godzinowych i zestawione zostały w tabeli 6-5:

**Tabela 6-5: Wartości zapotrzebowania na ciepło grzewcze dla obiektu testowego obliczone według czterech procedur obliczeniowych (suma wartości godzinowych).**

Rok		2009			2010		
Nr	Procedura wprowadzania danych	$\delta$ [%] Model 1	$\delta$ [%] Model 2	$\delta$ [%] Model 3	$\delta$ [%] Model 1	$\delta$ [%] Model 2	$\delta$ [%] Model 3
1	Geometrie ze skaningu laserowego i uśrednione wartości U	-39	-22	-9	-34	-18	-6
2	Rzeczywiste geometrie i uśrednione wartości U	-29	-19	-8	-23	-17	-3
3	Geometrie ze skaningu laserowego i rzeczywiste wartości U	-29	-13	-7	-23	-8	-4
4	Rzeczywiste geometrie (rzeczywista orientacja okien) i rzeczywiste wartości U	-20	-10	-5	-14	-8	+1

Analizując wartości z tabeli 6-5, zauważyć można wyraźną tendencję, polegającą na tym, iż wraz ze wzrostem szczegółowości danych wejściowych, dochodzi do zmniejszenia odchyłki pomiędzy wartością obliczoną a zmierzoną. W skrajnym przypadku, gdy dysponujemy szczegółowymi danymi wejściowymi (geometrie i współczynniki U), możliwe jest osiągnięcie nawet dwa razy większej dokładności. Jedyne w przypadku modelu 3, trend ten nie znajduje potwierdzenia. Tu niezależnie od stosowanej procedury, odchyłki leżą na stałym poziomie i nie przekraczają 6 %. Rys. 6-28 schematycznie przedstawia, w jaki sposób dokładność danych wejściowych wpływa na wartość obliczonego zapotrzebowania na energię cieplną.



**Rys. 6-28:** Odchyłki bezwzględne pomiędzy wartością pomiarową a wartościami obliczeniowymi zużycia/zapotrzebowania na energię cieplną dla obiektu testowego dla roku 2009.

Podsumowując, powyższa analiza obiektu testowego wykazuje, w jakim stopniu zgodność otrzymanych wyników z wartością pomiarową zależy od szczegółowości wprowadzanych danych wejściowych oraz od skali czasowej prognozowania, jak i od sposobu modelowania. W zależności od wariantu procedury obliczeniowej, odchyłka pomiędzy wartością pomiarową i wynikami z symulacji waha się w granicach 5 do 40%, przy czym wariant 4 charakteryzuje się najwyższą dokładnością wyników modelowania zapotrzebowania na energię cieplną.

## 7 Dyskusja wpływu parametrów użytkowych na eksploatację sieci grzewczej osiedla SHP.

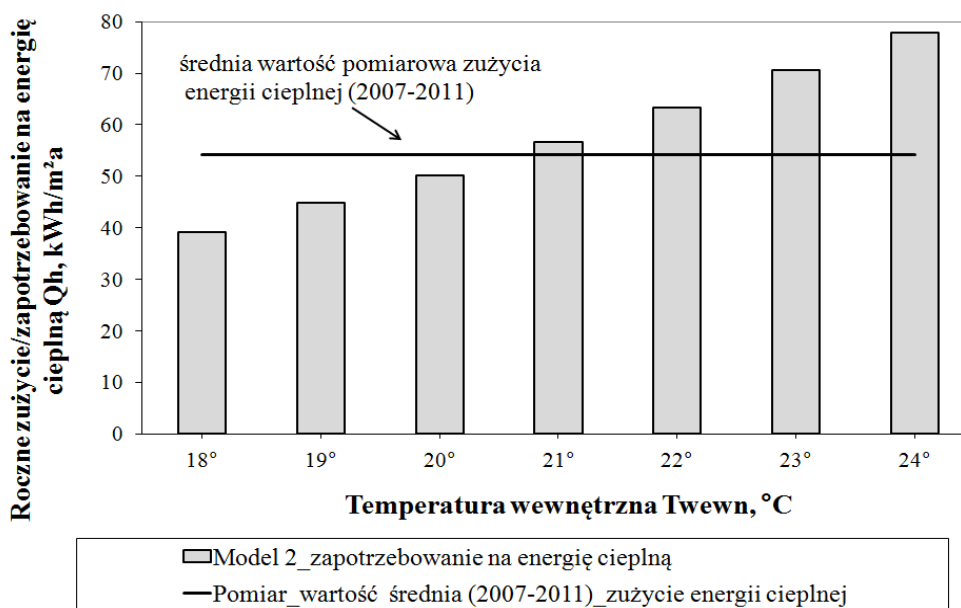
Analiza wpływu parametrów użytkowych na wartość zapotrzebowania na energię ciepłą przeprowadzona została na przykładzie wybranego odbiorcy sieci grzewczej osiedla SHP, którym jest wspomniany obiekt testowy. Główną zaletą analizy prowadzonej na przykładzie obiektu testowego jest dostępność szczegółowych danych pomiarowych, takich jak temperatura wewnętrzna, zyski wewnętrzne od osób i urządzeń elektrycznych. Analiza pozwoliła wyznaczyć wpływ poszczególnych parametrów użytkowych na zużycie/zapotrzebowanie na energię ciepłą, a wnioski z niej wynikające, stanowią punkt odniesienia dla pozostałych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP.

### 7.1 Dyskusja wpływu parametrów użytkowych na zapotrzebowanie na energię ciepłą obiektu testowego.

#### 7.1.1 Temperatura wewnętrzna

W pracy [33] stwierdza się, że wartość wymagana temperatury wewnętrznej, która w większości przypadków jest wartością zadaną przez termostatyczny regulator grzejnikowy, jest najbardziej znaczącym parametrem użytkowym. Również Shipworth [83] wskazuje na decydujący wpływ tego parametru na zużycie energii ciepłej. Z tego względu, analizę wrażliwości parametrów użytkowych na zużycie energii ciepłej niniejszej pracy rozpoczęto od tego właśnie parametru.

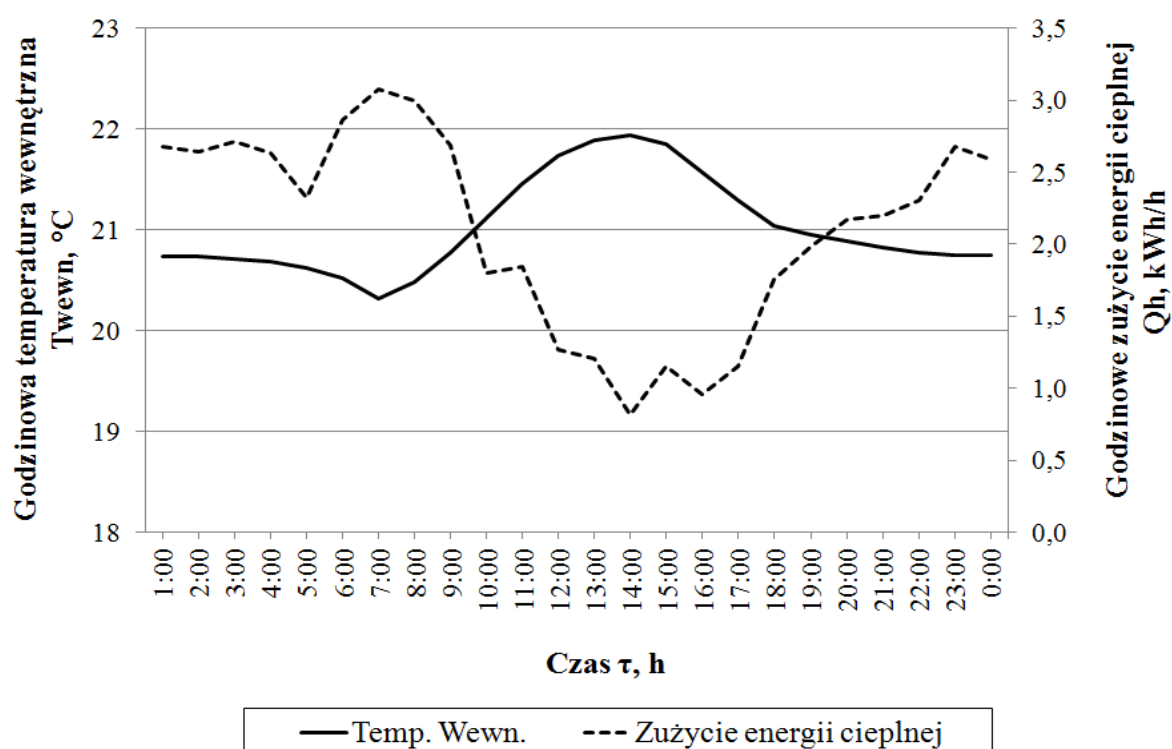
W pierwszej kolejności, przeprowadzono godzinową symulację zapotrzebowania na energię ciepłą kolejno dla temperatury wewnętrznej równej od 18 do 24°C. Wartości godzinowe zsumowano następnie do wartości rocznych, widocznych na Rys. 7-1.



Rys. 7-1: Roczne wartości zużycia/zapotrzebowania na energię ciepłą w zależności od różnych wartości temperatury wewnętrznej dla obiektu testowego (2009).

Jak wynika z Rys. 7-1, obliczone zapotrzebowanie na energię cieplną przy temperaturze wewnętrznej równej 21°C, najbardziej odpowiada uśrednionej rocznej zmierzonej wartości zużycia energii cieplnej dla lat 2007-2011, równej ok. 54,2 kWh/m<sup>2</sup>a dla obiektu testowego. Hipotetycznie, gdyby użytkownicy zadali temperaturę wewnętrzną na poziomie 19°C, możliwa byłaby redukcja zużycia energii cieplnej w obiekcie testowym o prawie 21%, a przy 18°C nawet o 31%. Hipoteza ta jest jednak bardzo uogólniona, ponieważ oprócz temperatury wewnętrznej, również inne parametry użytkowe składają się na ostateczne zużycie energii cieplnej.

Dla porównania, Rys. 7-2 przedstawia rzeczywisty dobowy profil zmian temperatury wewnętrznej, który zestawiony jest z dobowym profilem zużycia energii cieplnej. Oba profile zostały uśrednione dla 3 pododbiorców omawianego obiektu testowego i dla 28 dni (od 3 do 30 marca 2011 roku).



Rys. 7-2: Uśrednione wartości pomiarowe temperatury wewnętrznej i zużycia energii cieplnej dla 3 podobiektów obiektu testowego dla okresu czasu od 3 do 30 marca 2011 roku (28 dni).

Jak wynika z Rys. 7-2, zadana temperatura wewnętrzna w analizowanych podobiektach obiektu testowego leży pomiędzy 20 a 22°C. Wzrost temperatury wewnętrznej w godzinach dziennych, któremu towarzyszy spadek zużycia energii cieplnej, spowodowany jest głównie wpływem zysków od promieniowania słonecznego.

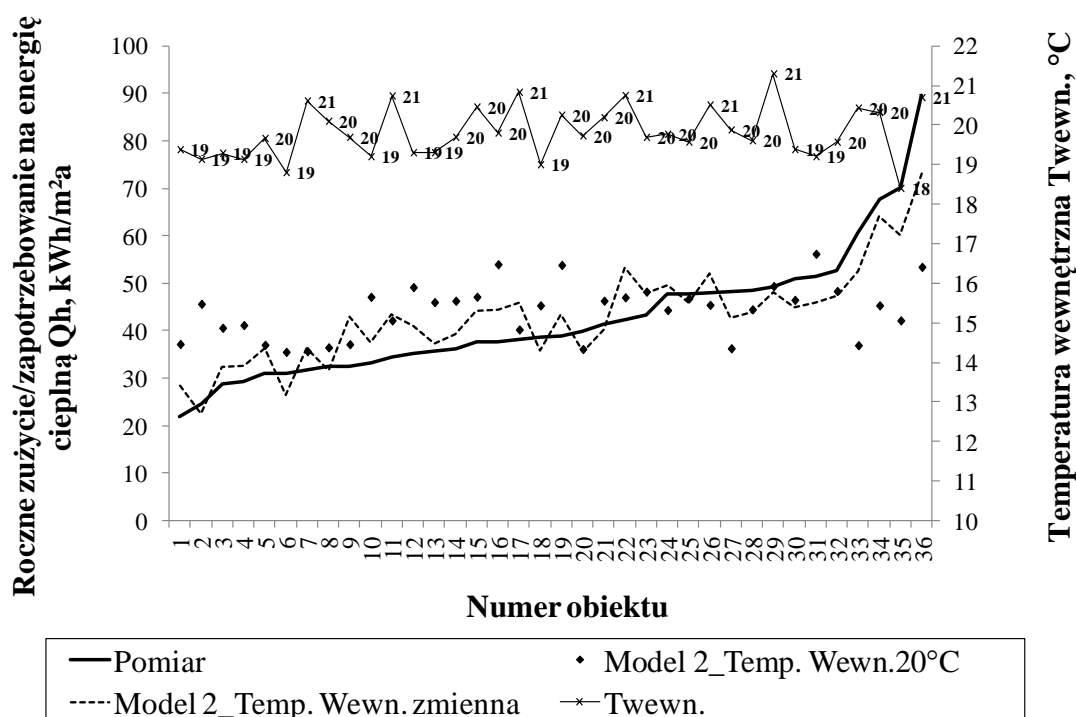
W kolejnym etapie dyskusji wpływu parametrów użytkowych na zużycie energii cieplnej, następuje przejście od jednego obiektu (obektu testowego) do całej grupy obiektów osiedla SHP. Omawiane obiekty należą do wybranej grupy domów rzędowych. Z uwagi na to, że obiekty poddane tej analizie są bardzo podobne do siebie (Rys. 7-3), należałoby oczekiwać, iż ich wartości zużycia energii cieplnej będą bardzo podobne do siebie.



Rys. 7-3: Zdjęcie kilku domków szeregowych z grupy A.

W rzeczywistości jednak, występują znaczne różnice zużycia energii cieplnej w obrębie badanych obiektów (patrz Rys. 7-4). Odchyłki pomiędzy obiektem o najniższym i najwyższym zużyciu energii cieplnej w stosunku do wartości średniej (53 kWh/m<sup>2</sup>a) równe są odpowiednio -60% i +85%.

Z uwagi na to, że obiekty te są bardzo podobne do siebie, wpływ zachowań użytkowników ma w tym przypadku istotne znaczenie. Aby udowodnić tę hipotezę, w pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenie zapotrzebowania na energię ciepłą przy użyciu stałej wartości temperatury wewnętrznej, równej 20°C. Rezultatem tego obliczenia jest mały przedział wartości zapotrzebowania na energię ciepłą leżący w granicach 37-56 kWh/m<sup>2</sup>a.



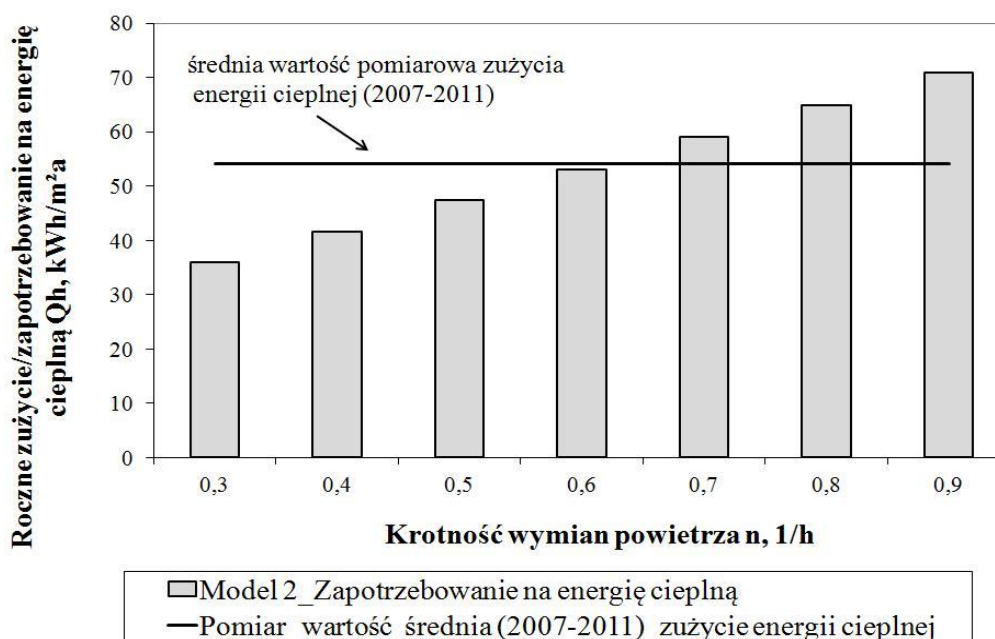
Rys. 7-4: Porównanie rocznych wartości zmierzonych z oliczeniowymi.

W kolejnym kroku, wykorzystano blok symulacyjny, umożliwiający wprowadzenie zmiennych losowych wartości temperatury wewnętrznej do modelu symulacyjnego. W tym celu zastosowano zmienne losowe parametru temperatury wewnętrznej, posiadające rozkład normalny Gaussa, o wartości średniej równej 20°C. Obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną dokonano kolejno dla każdego z obiektów przy różnych wartościach temperatury wewnętrznej. Wartość tego parametru zmieniano do momentu, gdy odchyłka pomiędzy wartością obliczoną a zmierzoną leżała poniżej 20%.

Z uwagi na to, że wartość temperatury wewnętrznej ma największy wpływ na zapotrzebowanie na energię cieplną, jak wykazano w punkcie 7.1.1, ograniczono się tutaj tylko do tego parametru. Celem analizy było przetestowanie przyjętej metodyki, ale w warunkach rzeczywistych na końcową wartość zapotrzebowania na energię cieplną wpływ ma kombinacja wszystkich parametrów użytkowych.

### 7.1.2 Krotność wymiany powietrza

Kolejnym istotnym parametrem użytkowym, jak wynika z pracy [11], jest krotność wymian powietrza. Również w przypadku tego parametru obliczono roczne wartości zapotrzebowania na energię cieplną w oparciu o godzinową symulację, zmieniając wartość krotności wymian powietrza od 0,3 do 0,9 1/h. Zapotrzebowanie na energię cieplną, obliczone przy krotności wymian powietrza równej 0,6 1/h charakteryzuje się najniższą wartością odchyłki przy porównaniu z wynikami z pomiaru. Jak wynika z Rys. 7-5, podczas minimalnej wentylacji leżącej na poziomie 0,3 1/h możliwa jest redukcja zużycia energii cieplnej o ponad 30%.

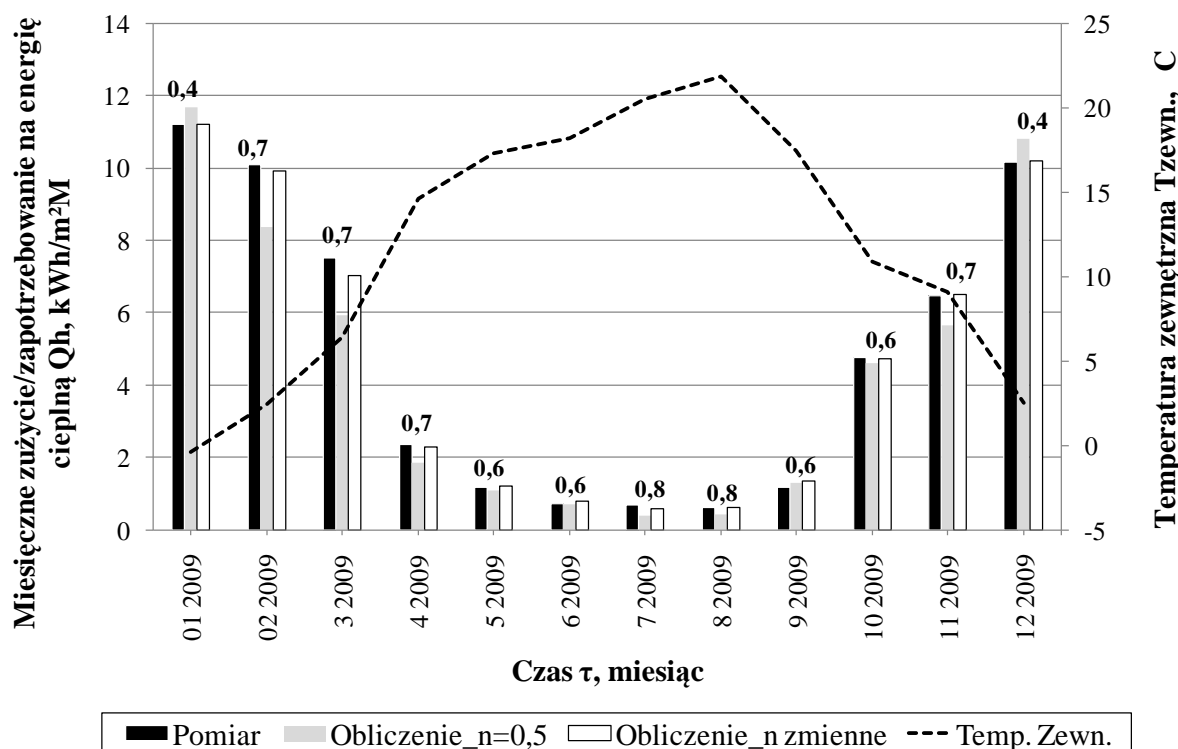


Rys. 7-5: Roczne wartości zużycia/zapotrzebowania na energię cieplną w zależności od różnych wartości krotności wymian powietrza dla obiektu testowego.

Praca Buschmanna i Juschki, [11] wykazała, iż wartość krotności wymian powietrza w warunkach rzeczywistych, jest zazwyczaj zmienna w zależności od pory roku. Parametr ten jest z reguły o wiele wyższy w miesiącach letnich niż w zimowych. Na przykładzie obiektu



testowego obliczono miesięczne wartości zapotrzebowania na energię cieplną, stosując różne wartości krotności wymian powietrza. W momencie, gdy wartość miesięczna obliczonego zapotrzebowania na ciepło grzewcze pokrywała się z wartością zmierzoną zużycia energii cieplnej, parametr krotności wymian powietrza został przyjęty jako wartość wejściowa, jak widać na Rys. 7-6.



Rys. 7-6: Porównanie miesięcznych wartości pomiarowych z pomiarowymi dla obiektu testowego dla różnych wartości krotności wymian powietrza.

### 7.1.3 Zyski wewnętrzne

Ostatnim parametrem użytkowym poddanym dyskusji w niniejszej pracy, są wewnętrzne zyski ciepła, które można podzielić na:

- bytowe, od osób przebywających w danym obiekcie,
- od oświetlenia elektrycznego,
- od innych urządzeń elektrycznych, Michalak [59].

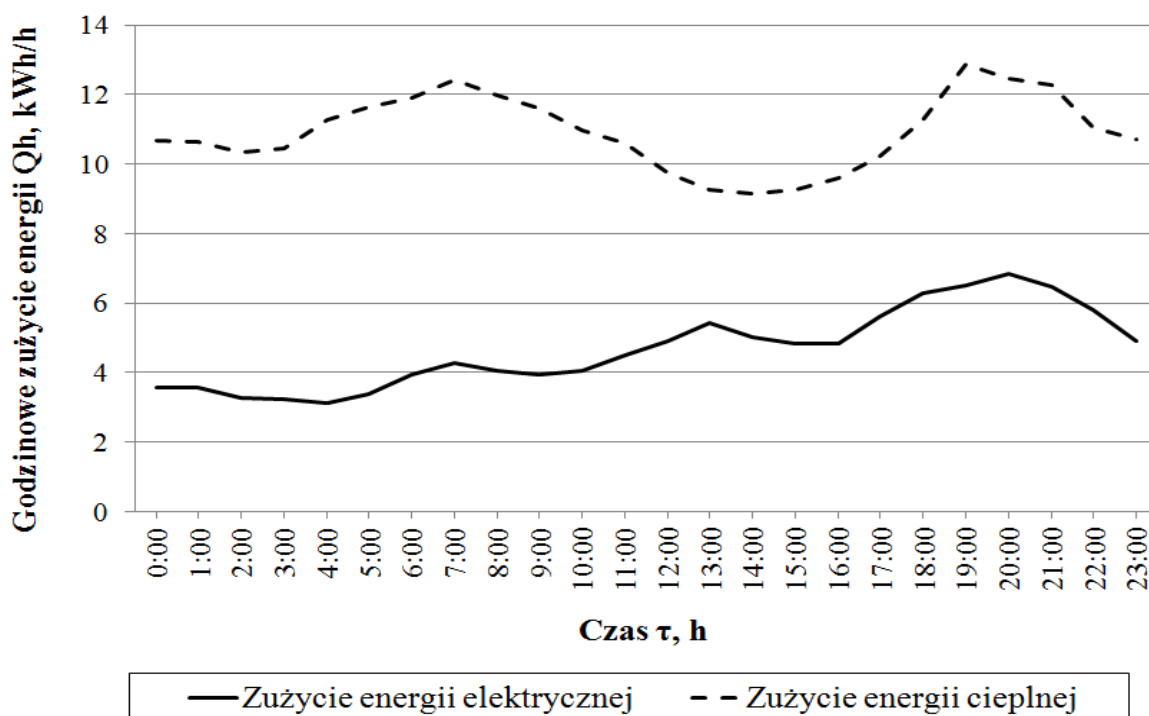
W niniejszej pracy, w przypadku obiektu testowego, zyski wewnętrzne zostaną omówione oddzielnie dla pochodzących od urządzeń elektrycznych i od osób.

#### 7.1.3.1 Wewnętrzne zyski ciepła od urządzeń elektrycznych

Wewnętrzne zyski ciepła od urządzeń elektrycznych zależą od czasu użytkowania urządzenia i jego mocy [59]. W celu dyskusji wpływu wewnętrznych zysków ciepła od urządzeń elektrycznych, przeprowadzono pomiar godzinowych wartości zużycia energii elektrycznej dla poszczególnych podobiektów omawianego obiektu testowego dla okresu czasu od października 2009 roku do września 2010 roku. W celu wyznaczenia zużycia



energii elektrycznej dla całego obiektu testowego, uśredniono wartości sumaryczne wszystkich podobiektów dla każdej godziny z osobna, jak widać na Rys. 7-7.



Rys. 7-7: Uśrednione godzinowe przebiegi zużycia energii elektrycznej i cieplnej dla obiektu testowego (10.2009 do 9.2010).

Przebieg zużycia energii elektrycznej, przedstawiony na Rys. 7-7, porównany jest z przebiegiem zużycia energii cieplnej, który również został uśredniony dla wszystkich podobiektów obiektu testowego i dla każdej godziny z osobna.

Jak wynika z Rys. 7-7, zauważalny jest znaczny wzrost zużycia energii elektrycznej, a co za tym idzie zysków wewnętrznych od urządzeń elektrycznych w okresie godzin wieczornych. Ma to związek z faktem, że użytkownicy obiektu, po powrocie z pracy korzystają z wszelkiego rodzaju urządzeń elektrycznych jednocześnie, powodując wzrost zużycia energii elektrycznej, a co za tym idzie wzrost zysków wewnętrznych od urządzeń elektrycznych. Jednakże zyski te nie są wystarczające, aby móc zrekompensować potrzeby cieplne, które są wyższe od zysków od urządzeń elektrycznych.

Wartości godzinowe zużycia energii elektrycznej, których średni przebieg roczny widoczny jest na Rys. 7-7, poddane zostały obróbce w celu wprowadzenia ich do modelu 2.

#### 7.1.3.2 Wewnętrzne zyski ciepła od osób

Wewnętrzne zyski ciepła od osób zapisane są zależnością, Dunn [20]:

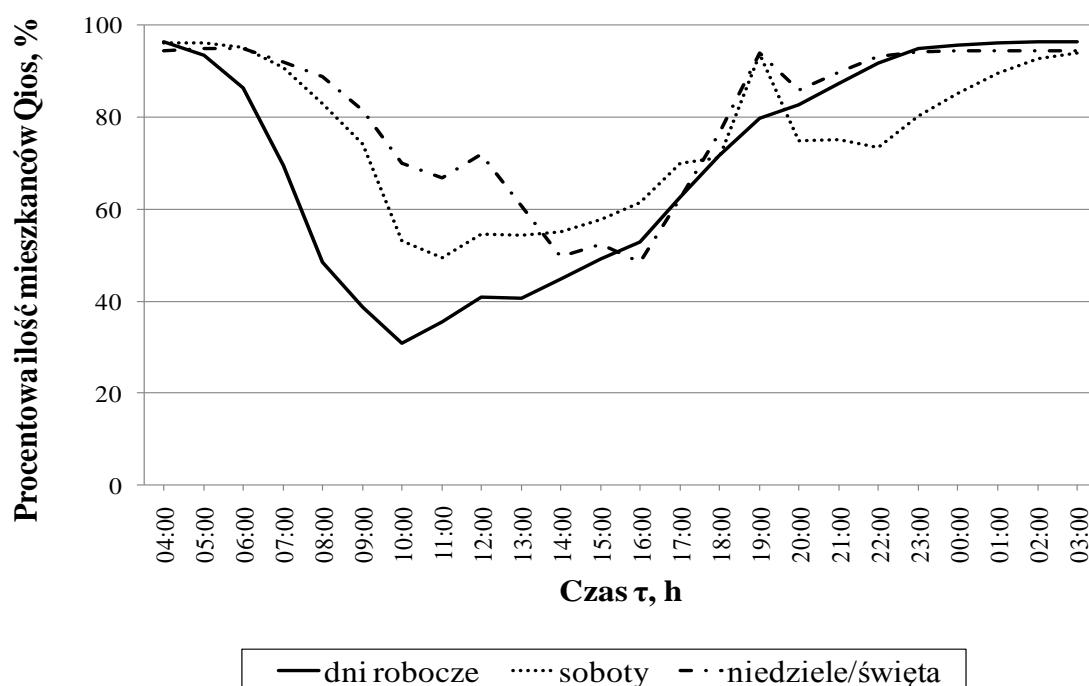
$$Q_{ios} = \tau n k P_b \quad (7-1)$$

Gdzie:

$\tau$  – średni czas przebywania osoby w budynku [s],

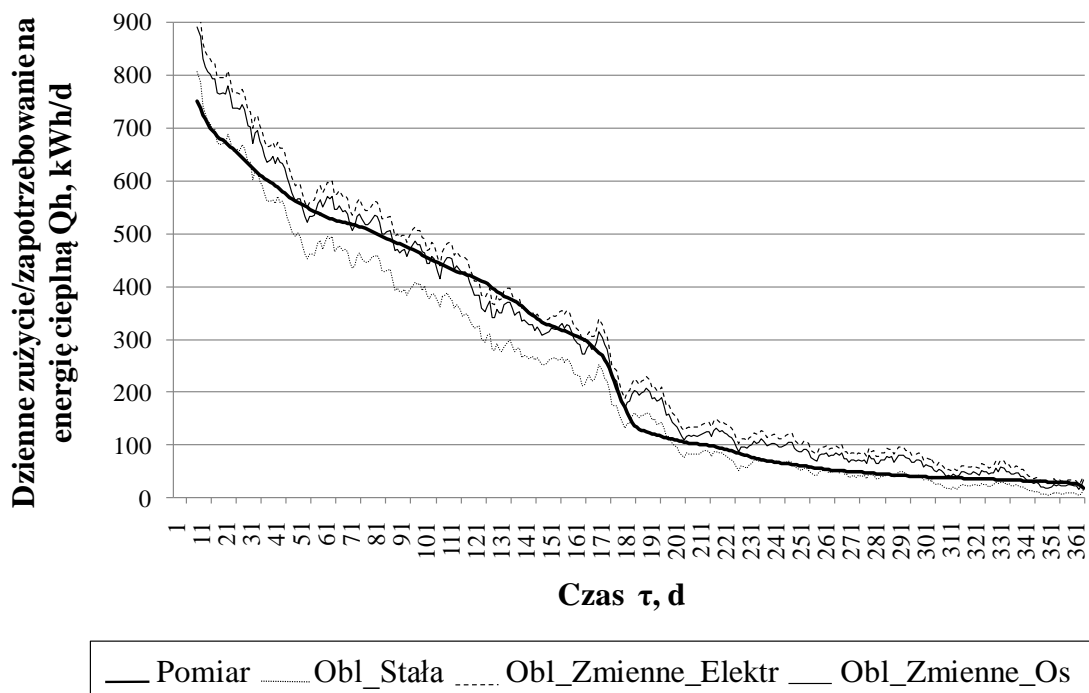
n - ilość osób [-],  
k – współczynnik jednoczesności przebywania w budynku osób [-],  
 $P_b$  – jednostkowe bytowe zyski ciepła dla osoby [W/osobę].

Dyskusję wpływu kolejnego parametru użytkowego na zużycie/zapotrzebowanie na energię cieplną, czyli wewnętrznych zysków ciepła od osób, oparto na danych statystycznych. Z uwagi na trudność w zdobyciu realnych danych dotyczących obecności użytkowników w badanym obiekcie, wykorzystano dane statystyczne z przeprowadzonych w 2001 roku ankiet w kilku miastach zachodniej Europy. Ankiety te [29], a było ich około 32000, przeprowadzone zostały w celu wyznaczenia dobowych przebiegów użytkowania pomieszczeń. Użytkownicy spisywali w 10-minutowych odstępach czasu, wszystkie wykonywane przez nich czynności dla dwóch typowych dni. Rys. 7-8 przedstawia uśrednione dobowe przebiegi dla obiektów wiorodzinnnych, z podziałem na 3 typy dnia: dni tygodnia, sobota oraz niedziela/święto.



Rys. 7-8: Statystyczne przebiegi procentowego udziału obecności mieszkańców w budynkach wielorodzinnnych [15].

W celu przeprowadzenia symulacji zapotrzebowania na energię cieplną, która uwzględnia zmienne wartości wewnętrznych zysków ciepła od osób, wykorzystano wartości procentowego udziału obecności użytkowników w obiektach, przedstawionego na Rys. 7-8. Wartości te, po pomnożeniu ich przez wartość jednostkowych bytowych zysków ciepła dla osoby ( $P_b$ ), przyjętych w zależności od aktywności i temperatury w pomieszczeniu pozwoliły otrzymać zmienny w czasie przebieg wewnętrznych zysków ciepła. Tak przygotowane wartości wprowadzone zostały do modelu symulacyjnego w celu obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną, którego wyniki pokazane są na Rys. 7-9.



**Rys. 7-9: Wpływ wewnętrznych zysków ciepła na przebieg zapotrzebowania na energię cieplną dla obiektu testowego (2009).**

Rys. 7-9 przedstawia codzienne zmierzone wartości zużycia energii cieplnej oraz 3 przebiegi wartości obliczeniowych, w zależności od wewnętrznych zysków ciepła. Pierwszy wariant obliczenia (Obl\_Stała), dokonany został przy stałych wewnętrznych zyskach cieplnych równych  $5 \text{ W/m}^2$ . Drugi wariant (Obl\_Zmienne\_Elekt), uwzględnia zmienne wewnętrzne zyski ciepłe od urządzeń elektrycznych, aproksymowane z wartości przedstawionych na Rys. 7-7. Trzeci wariant symulacji (Obl\_Zmienne\_Os), przeprowadzony został przy dodatkowym wprowadzeniu zmiennych wartości wewnętrznych zysków ciepła od osób, pobranych z danych statystycznych (Rys. 7-8). Ten ostatni przebieg zapotrzebowania na energię cieplną pozwolił zbliżyć się do przebiegu zmierzonych wartości zużycia energii cieplnej. Tabela 7-1 zawiera procentowe odchyłki wartości obliczeniowych przy użyciu wyżej opisanych trzech rodzajów obliczeń w porównaniu z wartością pomiarową.

**Tabela 7-1: Porównanie wartości pomiarowej z wartościami obliczeniowymi w zależności od wewnętrznych zysków cieplnych**

Zyski wewnętrzne	Błąd względny $\delta$ , % Model 2
Zyski wewn. stałe ( $5 \text{ W/m}^2$ )	-10
Zyski wewn. zmienne od urządzeń elektrycznych (z pomiaru)	+16
Zyski wewn. zmienne od osób (dane statystyczne)	+9

Jak wynika z tabeli 7-1, w przypadku, gdy symulacja zapotrzebowania na energię ciepłą przeprowadzona została w oparciu o stałą wartość parametru zysków wewnętrznych równych  $5 \text{ W/m}^2$ , odchyłka wynosi ok. 10%. W momencie, gdy wprowadzono do symulacji zmienne przebiegi wewnętrznych zysków ciepła od urządzeń elektrycznych (z pomiaru) i od osób (ze statystyk), odchyłka spadła do 9%.

## 7.2 Wizualizacja wyników przy użyciu systemu geoinformacyjnego

W celu wizualizacji rocznych wartości zużycia energii ciepłej dla poszczególnych odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, oraz ich publikacji na stronach internetowych wykorzystano system geoinformacyjny. Rys. 7-10 przedstawia przedziały zużycia energii ciepłej poszczególnych odbiorców, przy czym ich wartości przedstawiono za pomocą zmiennej gamy kolorów.



Rys. 7-10: Wizualizacja rocznych wartości zużycia energii ciepłej (2008).

Dane opublikowane w internecie to uśrednione wartości dla każdego typu odbiorcy, co wynika z kwestii ochrony danych osobowych. Publikacja ma na celu uwrażliwienie użytkowników na znaczny wpływ ich zachowania na końcową wartość zapotrzebowania na energię ciepłą, a w konsekwencji wzrost kosztów związanych z ogrzewaniem powierzchni mieszkalnych. Porównanie wartości rzeczywistego zapotrzebowania na energię ciepłą z wartościami docelowymi pozwoli zmotywować użytkowników do oszczędnej gospodarki energią. W efekcie końcowym ma to przyczynić się do redukcji zużycia energii ciepłej, a co za tym idzie emisji  $\text{CO}_2$ .

## 8 Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem niniejszej pracy było opracowanie metodyki prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą dla sieci grzewczych osiedli mieszkalnych w aspekcie eksploatacji sieci grzewczej osiedla SHP. Metodykę oparto na przykładzie energooszczędnego osiedla o nazwie Scharnhauser Park. W przypadku symulacji zapotrzebowania na energię ciepłą, opracowano oraz po części wykorzystano trzy modele obliczeniowe o różnym poziomie dokładności oraz blok symulacyjny, umożliwiającą analizę wpływu zachowań użytkowników.

Ważnym aspektem niniejszej pracy było połączenie wielu aplikacji komputerowych w jedną całość, tak aby umożliwić automatyczne obliczenie zapotrzebowania na energię ciepłą całej sieci grzewczej osiedla o znacznej liczbie odbiorców i mieszkańców.

Bardzo istotne było przeprowadzenie weryfikacji wyników z modeli symulacyjnych przy użyciu wyników pomiarów zużycia energii ciepłej w pomieszczeniu testowym i obiekcie testowym. Weryfikacja modeli symulacyjnych przy wykorzystaniu wyników monitoringu zapotrzebowania na ciepło grzewcze stanowi innowacyjny aspekt niniejszej pracy. W przypadku pomieszczenia i obiektu testowego możliwa była weryfikacja dla różnych okresów czasu (godzina, dzień, miesiąc, sezon, rok). W przypadku pozostałych obiektów, przeprowadzona została weryfikacja rocznych wartości na podstawie wartości zużycia energii ciepłej z manualnego odczytu. Jednym z najważniejszych aspektów tej pracy była ocena dokładności w zależności od:

- skali czasowej (godzina, dzień, miesiąc, sezon, rok),
- wielkości obiektu (pomieszczenie testowe, obiekt testowy, grupa obiektów, osiedle),
- szczegółowości pozyskiwania danych.

Na podstawie wyników weryfikacji zaprezentowanej w tej pracy metodyki, można stwierdzić, iż stanowi ona efektywne narzędzie prognozowania zapotrzebowania na energię ciepłą sieci grzewczych osiedli mieszkalnych. Wyniki niniejszej pracy, dotyczące rocznych wartości zużycia energii ciepłej przedstawione zostały przy pomocy systemu geoinformacyjnego i opublikowane na stronie internetowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obliczeń symulacyjnych stwierdzono, że możliwe jest prognozowanie zużycia energii ciepłej z dokładnością nawet do 1%. Aby osiągnąć taką dokładność wymagane są szczegółowe dane wejściowe dotyczące geometrii i właściwości termicznych analizowanego elementu sieci grzewczej, tak aby obliczenia tego można było dokonać przy użyciu dynamicznego modelu 3. Model ten jest w stanie odzwierciedlić dynamiczny charakter zjawisk cieplnych zachodzących w analizowanych elementach sieci grzewczej. Z uwagi na niedostępność wystarczająco dokładnych danych wejściowych do modelu 3 dla wszystkich odbiorców sieci grzewczej osiedla SHP, zdecydowano się wykorzystać ten model jedynie w celach testowych dla pomieszczenia i obiektu testowego.

Potencjał oszczędnościowy w przypadku adaptacyjnego prognozowania został wyznaczony w oparciu o kilka parametrów użytkowych, takich jak temperatura wewnętrzna, krotność wymian powietrza i zyski wewnętrzne od osób i urządzeń elektrycznych. W

przypadku np. temperatury wewnętrznej, hipotetycznie, gdyby użytkownicy zadali tę temperaturę na poziomie 19°C, możliwa byłaby redukcja zużycia energii cieplnej o prawie 21%, a przy 18°C nawet o 31%. W rzeczywistości, jak wykazały dane pomiarowe z obiektu testowego, temperatura wewnętrzna jest wyższa i leży w granicach 21°C. Analiza wpływu krotności wymian powietrza na zużycie/zapotrzebowanie na energię cieplną wykazała, iż podczas minimalnej wentylacji leżącej na poziomie 0,3 1/h możliwa byłaby redukcja zużycia energii cieplnej o ponad 30%. Należy jednak uwzględnić fakt znacznego wpływu zachowań użytkowników i proponuje się aby pierwszy i drugi rok eksploatacji był uwzględnieniem tych nawyków.

Również dobowa zmienność przebiegu zapotrzebowania na energię cieplną ma istotny wpływ na efektywność eksploatacji sieci grzewczej analizowanego osiedla. Racjonalne zarządzanie energią to ciągłe dostosowywanie podaży do zmiennego w czasie popytu, co może zostać osiągnięte przy pomocy inteligentnych liczników umożliwiających monitoring zużycia energii cieplnej poszczególnych odbiorców sieci grzewczej. Szczególnie w przypadku budownictwa niskoenergetycznego, ważne jest aby przy pomocy indywidualnego monitoringu zmotywować odbiorców sieci grzewczej do zmiany swych nawyków. Analiza zużycia energii cieplnej poszczególnych, podobnych pod względem charakterystyki energetycznej użytkowników, wskazała na spore rozbieżności pomiędzy nimi. Lepsza regulacja, czy też obniżenie komfortu cieplnego poszczególnych odbiorców sieci grzewczej może więc przyczynić się do sporych oszczędności energii, dochodzących nawet do 30%. Pozwoliłoby to w efekcie końcowym usprawnić eksploatację sieci grzewczej, która odbyłaby się poprzez bieżącą kontrolę zużycia energii cieplnej poszczególnych jej odbiorców oraz połączenie ich z dostawcą energii w jeden inteligentny system.

## 9 Spis literatury

- [1] Agencja Rynku Energii S.A., 2011, *Dobowe prognozy godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną*.
- [2] Baehr, H.D., Stephan, K., 2006, *Wärme- und Stoffübertragung*, Berlin Heidelberg, Springer Verlag
- [3] Blesl, M., 2002, *Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs*, Dissertation der Universität Stuttgart.
- [4] Blesl, M., 2010, *Erfassung des räumlich hoch aufgelösten Raumwärmebedarfs*, EuroHeat&Power 39, Heft 1-2.
- [5] Bitkom-Pressemitteilung, 26.09.2008. *Digitale Stromzähler helfen beim Sparen*, [http://www.bitkom.org/de/presse/56204\\_54200.aspx](http://www.bitkom.org/de/presse/56204_54200.aspx)
- [6] Bohm, B., Danig, P.O., 2004, *Monitoring the energy consumption in a district heated apartment building in Copenhagen, with specific interest in the thermodynamic performance*, Energy and Buildings 36, p. 229-236
- [7] Bojarski, W., 1998, *Rynek odbiorcy energii*, Badania systemowe "EnergSys" Sp. z o. o., Warszawa.
- [8] Borowiecki, I., 2006, *Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego dla celów opracowania NMT (ocena dokładności pomiarów lidarowych)*, Geodezja, Kartografia i Aerofotogrametria, 71, s. 211-217.
- [9] Bossel, Hartmut, 2004, *Systeme, Dynamik, Simulation; Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*, Books on Demand GmbH, Norderstedt, ISBN 3-8334-0984-3.
- [10] Branco, G., Lachal, B., Gallinelli, P., Weber, W., 2004, *Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based in long-term experimental data*, Energy and Building 36, p. 543-555
- [11] Buschmann, A., Juschka, W., 2005, *Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Methoden des kommunalen Energiemanagements, Eine Untersuchung am Beispiel von fünf Wohngebäuden in der Siedlung Scharnhäuser Park*, Masterarbeit, Hochschule für Technik Stuttgart.
- [12] CAS, 2002, *Case study: Wdrażanie inteligencji w sieciach ciepłowniczych na przykładzie koncepcji „Inteligentna sieć ciepłownicza“ dla SPEC S.A.*, Warszawa.
- [13] Ciepło Systemowe, 2011, *Europa będzie oszczędzać energię*, Magazyn, III Kwartał, nr. 012.
- [14] Ciepło Systemowe, 2011, *Profesjonalna termomodernizacja*, Magazyn, III Kwartał, nr. 012.
- [15] Destatis, Zeitbudgeterhebung (ZBE), 2001/02 Time Use Survey (TUS).

- [16] Diamond, R.C., M.A. Piette, B. Nordman, O. de Buen, and J. Harris, 1992, *The Performance of the Energy Edge Buildings: Energy Use and Savings*, In Proceedings of ACEEE 1992 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 3, Berkeley, CA:ACEEE, 1992, pp. 3.47-3.60.
- [17] DIN EN 12831, 2003, *Heizungsanlagen in Gebäude – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [18] DIN V 18599 – Energy efficiency of buildings - *Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Supplement 1: Balancing of demand and consumption*
- [19] DIN 4108-6 – *Wärmeschutz und Energie – Einsparung in Gebäuden- Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*
- [20] Dunn, G. N., Knight, I. P., 2003, *Evaluation of Heat Gains in US Office Environments*, Worldwide CIBSE/ASHRAE Gathering of the Building Services Industry, Edinburgh.
- [21] Duran, Özlem, 2010, *Energy Consumption Simulation for Residential Houses in Scharnhauser Park*, Project within SENCE Master Course, Stuttgart University of Applied Sciences.
- [22] Eicker, U. (ED.), 2012, *POLYCITY – Energy Networks in Sustainable Cities*, Karl Krämer Verlag Stuttgart + Zürich, ISBN 978-3-7828-4051-4.
- [23] Eicker, U., Strzalka, A., Erhart, T., Perrella Balestieri, J.A., 2011, *Low Energy City Quarters with high Renewable Fractions: Monitoring Results and Potential for Replication in Brazil*, International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development (SUSB), SUSB Vol. 2, No. 1, s. 69-79.
- [24] Elsam, 2010, *Sieci neuronowe, Przykład zastosowania: prognozowanie zapotrzebowania na ciepło*, Broszura.
- [25] EnEV 2009, *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)*
- [26] EnSan-Projekt Karlsruhe-Goerdelerstraße, 2001-2004, *Integrale Sanierung auf Niedrigenergie-Standard unter Einschluss moderner Informations- und Regelungstechnik und Beeinflussung des Nutzerverhaltens*, Abschlussbericht.
- [27] EPBD (ang. Energy Performance of Buildings Directive), Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 in the energy performance of buildings.
- [28] Fedorowicz, R., Huk, R., Kołodziński, E., Kowalski, A., 2002, *Komputerowe wspomaganie zarządzania siecią ciepłowniczą. Zakres i możliwości komputerowego wspomaganie zarządzania siecią ciepłowniczą*, Czasopismo Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, R. 33, nr 11, s. 3-9.
- [29] Federal Statistic Office, 2008, *Time Use Survey Germany*, Study Documentation
- [30] Feist, W., 2006, *Podstawy budownictwa pasywnego*, Polski Instytut Budownictwa pasywnego, Gdańsk.
- [31] Fink J., 2006, *Demonstrator for clean biomass combustion in urban areas*. Raport



- projektu POLYCITY, Stuttgart.
- [32] Fink, J., 2006, *Verbesserte Betriebsführung von Biomasse-Nahwärmesystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung am Beispiel des Scharnhauser Parks*, Praca dyplomowa, Fachhochschule Ansbach, Esslingen.
- [33] Firth, S.K., Lomas, K.J. and Wright, A.J., 2010, *Targeting household energy-efficient measures using sensitivity analysis*, Building Research & Information 38, pp.25-41
- [34] Firth, S.K., Lomas, K.J., 2009, *Investigating CO<sub>2</sub>-Emission Reduction in Existing Urban Housing*, Proceedings of Building Simulation 2009, 11<sup>th</sup> IBPSA Conference, Glasgow.
- [35] Forschungszentrum Jülich GmbH, 2009, *Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien*.
- [36] Frost & Sullivan, 2010, *Polska na początku drogi w rozwoju rynku inteligentnych liczników*, Serwis Energetyka.
- [37] Glueck, B., 1997, *Wärmetechnisches raummodell*, C.F. Mueller Verlag, Heidelberg
- [38] Goździkowski, A., Tańczuk, M., Ulbrich R., 2010, *Miejskie systemy ciepłownicze z kogeneracją jako efekt zmieniających się uwarunkowań technicznych i ekonomicznych*, Materiały XIV Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje.
- [39] Hahn, M., 2007, *Extraction of spacious buildings from airborne LIDAR data*, Research project at the Stuttgart University of Applied Sciences.
- [40] Heim, D., Panek, A., 2008, *Miesięczna metoda bilansowa obliczania zapotrzebowania na ciepło i chłód do określania charakterystyki energetycznej budynków*, Miesięcznik Izolacje Nr. 6, s. 32-36.
- [41] Hobler, T., 1979, *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwo Naukowe Warszawa, ISBN 83-204-0064-3
- [42] INSEL – poradnik obsługi programu, firma Doppelintegral GmbH, www.insel.eu
- [43] Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), 2003, *Deutsche Gebäudetypologie –Systematik und Datensätze*.
- [44] Jaffal, I., Inard, Ch., Ghiaus, Ch., 2009, *Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments*, Energy and Buildings 41, s. 669-677.
- [45] Janowicz, L., 2011, *Inteligentne sieci energetyczne*, Dwumiesięcznik Nowa Energia, 4(22), ISSN 1899-0886, artykuł, s. 36.
- [46] Jones, P.J., Vanghan, N.D., Cooke, P., Sutcliffe, A., 1997, *An energy and environmental prediction model for cities*, Book: Evaluation of the Built Environment for Sustainability, E&FN Spon, London, Page 53-66.
- [47] Junghans, Antje, 2009, *Bewertung und Steigerung der Energieeffizienz kommunaler Bestandsgebäude*, Gabler-Verlag, Wiesbaden.
- [48] Kasperkiewicz, K., 2005, *Metoda oceny zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania istniejących budynków mieszkalnych*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej, R. 34, nr 3, s. 15.
- [49] Kasperkiewicz, K., *Nowe zasady obliczania projektowego obciążenia cieplnego pomieszczeń i budynków wg PN-EN 12831: 2006 „Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego”*.

- [50] Kostowski, E., 2009, *Promieniowanie cieplne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, ISBN 978-83-7335-639-9.
- [51] Kręcielewska, E., Lebek, A., Smyk, A., 2011, *Analiza możliwości zmniejszenia kosztów przesyłania i strat ciepła przez integracje rurociągów preizolowanych tradycyjnych, podwójnych i giętkich*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 42/7-8, S. 275-285.
- [52] Kukła, P., Liszka, Sz., Wojtulewicz, J., 2009, *Analiza potencjału zmniejszenia zużycia energii w nowych budynkach w wyniku zastosowania wyższych standardów w zakresie izolacyjności przegród zewnętrznych*, Raport WWF przygotowany przez FEWE we współpracy z ISOVER.
- [53] Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold, 1997, *Lehrbuch der Bauphysik*, Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima, Teubner Stuttgart, ISBN: 3-519-35014-9.
- [54] Maraver D., et al.: *Thermodynamic optimization of a trigeneration system based on biomass combustion*. Materiały Konferencji 17th European Biomass Conference, Hamburg.
- [55] Marecki, J., 2001, *Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [56] Mathews, E.H., et al., 1997, *A Novel Thermal Simulation Model and its Application on Naturally Ventilated Desert Buildings*, Building and Environment, Vol. 32., No. 5: 447-456.
- [57] Mavrogianni, A., Davies, M., Kolokotroni, M. and Hamilton, I., 2009, *A GIS-based bottom-up space heating demand model of the London domestic stock*, Proceedings 11th International IBPSA Conference, Building Simulation, Glasgow.
- [58] McClellan, T. M., and Pedersen, C.O., 1997, *Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation*, ASHRAE Transactions, Vol. 103, Part 2, pp. 469-484.
- [59] Michałak, P., 2009, *Badania efektywności energetycznej budynku użyteczności publicznej wykorzystującego odnawialne źródła energii*, Rozprawa Doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- [60] Misiorek, A., Piesiewicz, T., 2001, *Praktyczne wykorzystanie technik informatycznych w prognozowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną*, VIII Konf. Nauk.-Techn. REE'2001, Kazimierz Dolny.
- [61] Misiorek A., Weron R., 2004, *Modelowanie sezonowości a prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną*, Energetyka, s. 780-785.
- [62] Niezabitowska, E., 2005, *Budynek inteligentny*, Książka: Potrzeby użytkownika a standard budynku inteligentnego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN: 83-7335-224-4.
- [63] Norwisz, J., 2004, *Termomodernizacja budynków dla poprawy jakości środowiska*, Poradnik dla audytorów energetycznych, inspektorów środowiska, projektantów oraz zarządców budynków i obiektów budowlanych, ISBN: \*83-86337-08-7, wydane przez Narodową Agencję Poszanowania Energii, Warszawa.

- [64] Pietruschka, D., 2010, *Model based control optimisation of renewable energy based HVAC systems – Solar driven absorption and open desiccant evaporative cooling*, Dissertation (PhD) in cooperation between the University of Applied Sciences in Stuttgart and the De Montfort University in Leicester, UK.
- [65] Pfeifer, Klobasa et al, 2009, *Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien*, AGFW-Hauptstudie.
- [66] Plutecki, Z., 2003, *Analiza zjawisk ciepło-przepływowych w ogrzewanym pomieszczeniu*, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole.
- [67] prEN 15271, 2005, *Energy Performance of buildings – Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*.
- [68] PN-B-02025: *Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego*.
- [69] PN-EN-12831: 2006: *Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*.
- [70] PN-EN ISO 13790:2008: *Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia*.
- [71] PN-EN ISO 6946, 2004, *Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny I współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania*.
- [72] *Proposals for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of Buildings*, 2001, Brussels, 11.5.2001 COM, 226 final.
- [73] Ratti, C., Baker, N., Steemers, K., 2005, *Energy consumption and urban texture*, Energy and Buildings 37. p. 762-776.
- [74] Richter, W., 2003, *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern*, TU Dresden, Fraunhofer IRB Verlag
- [75] Renewable Energy Sources Act, 2004, *Act of granting priority to renewable energy sources*.
- [76] Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U., 2009, *CITYSIM: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*. Proceedings 11<sup>th</sup> Intern. IBPSA Conference. Glasgow.
- [77] Roth, U. et al., 2008, *Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen*, Schriftreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 06.044, Bonn.
- [78] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6.11.2008 w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej. (Dz.U. nr 201, poz.1240).

- [79] Santin, O. G., Itard, L., Visscher, H., 2009, *The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock*, Energy and Buildings 41, p. 1223-1232
- [80] Sarak, H., Satman, A., 2003, *The degree-day method to estimate the residential heating natural gas consumption in Turkey: a case study*, Energy 2008, Page 929-939.
- [81] Seppänen, O., 2010, *Nowelizacja EPBD wprowadza nowe wymagania dotyczące charakterystyki energetycznej budynków*, Czasopismo Energia i budynek, 1-2, s. 12-15.
- [82] Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., Mizuno, M., 2004, *Residential end-use energy simulation at city scale*, Building and Environment 39: 959-967.
- [83] Shipworth, D., 2010, *The Vernacular Architecture of Household Energy Models, Modelling in the Social Sciences: Interdisciplinary Comprison*, Helsinki Collegium for Advances Studies, 17-18 June 2010.
- [84] Siegel, R., Howel, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 1981, ISBN 0-89116-506-1, Second Edition.
- [85] Skotnicki, P., Weisser, P., 2009, *Nowoczesność vs. Ekonomia. Trójgeneracja w ciepłownictwie*, Energetyka cieplna i zawodowa, Nr. 4, s. ?
- [86] Śnieżyk, R., 2006, *Metoda egzekwowania mocy zamówionej odbiorców ciepła*, Czasopismo „Rynek Energii”, Nr. 6, s. 46-49.
- [87] Springer, M., 2011, *Dobór materiałów izolacyjnych w warunkach budownictwa zrównoważonego*, Czasopismo „Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja”, 42/7, s. 303-305.
- [88] Springer, M., 2008, *Analiza energetyczna budynku firmy Fleksus*, Würzburg.
- [89] Stachowicz, A., Fedorczyk-Cisak, M., 2009, *Projektowanie budynków niskoenergetycznych jako problem optymalnego ich kształtowania*, Miesięcznik Izolacje, Nr. 5, s. 22-27.
- [90] Stępień, J.C., 2007, *Prognozy zapotrzebowania na ciepło na terenach o małym stopniu zurbanizowania*, Czasopismo „Rynek Energii”, Nr. 6, s. 38-41.
- [91] Strzałka, A., Strzałka, R., Eicker, U., Ulbrich, R., Tańczuk, M., 2011, *Doświadczenia w zakresie eksploatacji systemu ciepłowniczego osiedla energooszczędnego Scharnhauser Park k. Stuttgartu*, XV Forum Ciepłowników, Międzyzdroje.
- [92] Strzałka, A., Bogdahn, J., Coors, V., Eicker, E., 2011, *3D City Modelling for Urban Scale Heating Energy Demand Forecasting*, ASHRAE HVAC&R Research Journal on "Indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings", Volume 17, Issue 4, s. 526-539.
- [93] Strzałka, A., Huber, M., Pietruschka, D., Eicker, U., 2010, *Monitoring des Wärmeverbrauchs zur Analyse des Nutzerverhaltens in Wohngebäuden der Siedlung Scharnhauser Park*, BauSim 2010 „Gebäudesimulation in Wandel“, Wien, Austria
- [94] Strzałka, A., Eicker, U., Ulbrich, R., 2009, *Assessment of Photovoltaic Potential in Residential Area Scharnhauser Park*, Proceedings of 2009 Opole International Conference, Opole, Poland, page 353-364.

- [95] Strzałka, A., 2009, *Wpływ parametrów użytkowych na zużycie energii cieplnej w budynkach mieszkalnych*, Zeszyty Naukowe, III Warsztaty Środowiskowe, Głuchołazy.
- [96] Strzałka R., Eicker U., Ulbrich R., 2009, *Analysis of a biomass tri-generation-system in an urban area*. Materiały Konferencji 17th Biomass Conference, Hamburg.
- [97] Szczechowiak, E., 2009, *Podejście zintegrowane w projektowaniu budynków współczesnych*, Politechnika Poznańska.
- [98] Szmit, A., 2008, *Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną, Studium empiryczne dla regionu łódzkiego*, Zastosowanie metod statystycznych w badaniach naukowych III, StatSoft Polska.
- [99] Szymczak, J., 2011, *Stan branży ciepłowniczej i potrzeba zmian*, Dwumiesięcznik Nowa Energia, 4(22), ISSN 1899-0886, s. 74.
- [100] Szymiec, M., 2008, *Energooszczędny dom przyszłości. Dom Pasywny*, www.energieodnawialne.pl
- [101] SWE: *Cost/benefit report for heat/cold and electricity generation*. Raport projektu Polycity, 2006, Stuttgart.
- [102] Tłuczak, A., 2009, *Efektywność modeli adaptacyjnych w prognozowaniu cen rolnych*, Praca zbiorowa pod redakcją Rafała Zelaznego „Koniunktura gospodarcza a funkcjonowanie rynków, Wydział Ekonomiczny, Uniwersytet Opolski, Katowice, s. 123.
- [103] Ulbrich, R., 2000, *Alternatywne źródła energii*, Studia i Monografie, z. 122, Politechnika Opolska, ISSN 1429-6063, Opole.
- [104] Ulbrich, R., 2001, *Audyt energetyczny a dom energooszczędny*, Studia i Monografie, z. 130, Politechnika Opolska, ISSN 1429-6063.
- [105] Van Loo S., Koopejan J., 2008, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, London 2008.
- [106] Walton, G.N., 1983, *Thermal analysis research program reference manual*, NBSSIR 83-2655, National Bureau of Standard.
- [107] Weizsäcker E.U., Lovins A.B., Lovins L.H., 1996, *Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbierter Naturverbrauch*, Droemer Knauer, München
- [108] Wojdyga, K., 2007, *Prognozowania zapotrzebowania na ciepło w miejskich systemach ciepłowniczych*, Czasopismo „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska, z. 53, s. 3-110.
- [109] *Ustawa z dnia 21 listopada 2008 r. o wspieraniu termomodernizacji i remontów*, Dz. U. Nr 233, poz. 1459.
- [110] Ziębik, A., Szargut, J., 1995, *Podstawy gospodarki energetycznej*, Skrypt uczelniany Nr 1858, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [111] <http://83.18.34.250/system.html>

## 10 Załącznik – tok obliczeniowy modelu matematycznego (model 2)

Tok obliczeniowy modelu matematycznego do obliczania zapotrzebowania na energię ciepłą na ogrzewanie budynków mieszkalnych określony jest w normie europejskiej DIN V 18599 [18].

### 10.1 Obliczenia wstępne

- Kubatura ogrzewanej części elementu, netto:  $V_{Netto}[m^3] = 0,8V_{Brutto}$  (10-1)

- Współczynnik ochrony przed wiatrem:  $E_{Wiatru}[-] = 0,07$  (10-2)

- Krotność wymian powietrza na drodze infiltracji:  $N_{inf}[1/h] = N_{50}E_{wiatru}$  (10-3)

Gdzie:

$N_{50}$  – krotność wymian powietrza przy 50 Pa różnicy ciśnień (wartość standardowa) [1/h]

- Krotność wymian powietrza (infiltracja, powierzchnie przezroczyste):

Obecnie w przypadku wentylacji naturalnej, jako wartość krotności wymian powietrza,  $N$  przyjmuje się wartość z następujących dwóch wielkości: krotności wymian powietrza na drodze infiltracji,  $N_{inf}$  oraz krotności wymian powietrza przez powierzchnie przezroczyste (np. okna),  $N_o$ , jak wynika ze wzoru:

$$N[1/h] = N_{inf} N_o \quad (10-4)$$

### 10.2 Obliczenia współczynników strat mocy ciepłej

- Współczynnik strat mocy ciepłej na wentylację oblicza się ze wzoru:

$$H_{Ve}[W/K] = C_p \rho_p N_{inf} V_{netto} \quad (10-5)$$

Gdzie:

$C_p$  – pojemność cieplna powietrza [Wh/(kgK)]

$\rho_p$  – gęstość powietrza [kg/m<sup>3</sup>]

- Współczynnik strat mocy ciepłej przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne

a) Obliczenie współczynnika strat mocy ciepłej przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne,  $H_{zi}$

Współczynnik strat ciepła  $H_{zi}$  obejmuje ciepło przekazywane przez przenikanie z przestrzeni ogrzewanej do środowiska zewnętrznego lub sąsiedniej przestrzeni ogrzewanej do znacząco innej temperatury. Współczynnik ten oblicza się w następujący sposób:

$$H_{zi} [W / K] = U_{zi} A_{zi} \quad (10-6)$$

Gdzie:

$U_{zi}$  – współczynnik przenikania ciepła i-tej przegrody zewnętrznej, [W/(m<sup>2</sup>K)]

$A_{zi}$  – pole powierzchni i-tej przegrody zewnętrznej, pomniejszone przez pole powierzchni przezroczystych, [m<sup>2</sup>]

b) Obliczenie współczynnika strat mocy cieplnej ciepła przez przenikanie przez przegrody przezroczyste,  $H_{zo}$

Współczynnik  $H_{zo}$  obejmuje ciepło przekazywane przez przenikanie z przestrzeni ogrzewanej do środowiska zewnętrznego poprzez przezroczyste przegrody zewnętrzne, np. okna. Współczynnik ten oblicza się w następujący sposób:

$$H_{zo} [W / K] = U_{oi} A_{oi} \quad (10-7)$$

Gdzie:

$U_{oi}$  – Współczynnik przenikania ciepła przegród przezroczystych w i-tej ścianie, [W/(m<sup>2</sup>K)]

$A_{oi}$  – pole powierzchni przegród przezroczystych w i-tej ścianie [m<sup>2</sup>]

c) Obliczenie pojemności cieplnej budynku,  $C_u$

$$C_u = C_w A \quad (10-8)$$

Gdzie:

$C_w$  – pojemność cieplna budynku w odniesieniu do powierzchni [Wh/(m<sup>2</sup>K)]

○  $C_w = 50$  [Wh/(m<sup>2</sup>K)] dla budownictwa o konstrukcji lekkiej

○  $C_w = 90$  [Wh/(m<sup>2</sup>K)] dla budownictwa o konstrukcji średnio-masywnej

○  $C_w = 130$  [Wh/(m<sup>2</sup>K)] dla budownictwa o konstrukcji masywnej

$A$  – pole powierzchni ogrzewanej [m<sup>2</sup>]

Pojemność cieplna obiektu umożliwia obliczenie stałej czasowej  $\tau$  dla jego wychładzania:

$$\tau = \left( \frac{C_u}{H_{zi} + H_{ve}} \right) \quad (10-9)$$

### 10.3 Obliczenie redukcji nocnej w ogrzewaniu

a) Moduł 1: całodobowy tryb ogrzewania

$$T_{wzred} [^{\circ}C] = T_w \quad (10-10)$$

Gdzie:

$T_{wzred}$  – temperatura wewnętrzna podczas redukcji nocnej w ogrzewaniu [ $^{\circ}C$ ]

$T_w$  – temperatura wewnętrzna podczas ogrzewania [ $^{\circ}C$ ]

- Moduł 2: tryb redukcji nocnej w ogrzewaniu

$$F_{noc} [-] = 0,13 \frac{t_{noc}}{24} \exp\left(-\left(\frac{\tau}{250}\right)\right) \quad (10-11)$$

Gdzie:

$F_{noc}$  – Współczynnik korekcyjny dla trybu redukcji nocnej w ogrzewaniu [-]

$t_{noc}$  – czas trwania trybu redukcji nocnej w ogrzewaniu ( $T_{noc}=24h-th,op,d$ ; z th,op,d dzienny czas trwania ogrzewania wg DIN V 18599-10) [h]

$\tau$  - stała czasowa dla wychładzania obiektu

$$T_{wzred} [^{\circ}C] = \max\left(T_{wog} - F_{noc}\left(T_{wog} - T_{zsr}\right), T_{wog} - \Delta T_{noc} \frac{T_{noc}}{24}\right) \quad (10-12)$$

Gdzie:

$T_{wog}$  – temperatura w trybie ogrzewania [ $^{\circ}C$ ]

$T_{zsr}$  – średnia wartość miesięczna dla temperatury zewnętrznej [ $^{\circ}C$ ]

$\Delta T_{noc}$  – dopuszczalne obniżenie temperatury wewnętrznej wg DIN V 18599-10 podczas trybu redukcji nocnej w ogrzewaniu [K]

$T_{noc}$  – temperatura wewnętrzna w nocy [ $^{\circ}C$ ]

b) Moduł 3: Wyłączenie ogrzewania

$$F_{noc} [-] = 0,26 \frac{t_{noc}}{24} \exp\left(-\left(\frac{\tau}{250}\right)\right) \quad (10-13)$$

$$T_{wzred} = \max\left(T_{wog} - F_{noc}\left(T_{wog} - T_{zsr}\right), T_{wog} - \Delta T_{noc} \frac{T_{noc}}{24}\right) \quad (10-14)$$

Obliczenie różnicy temperatur pomiędzy wewnątrz a zewnątrz; Trozn

$$T_{rozn} [K] = T_{wzred} - T_{zsr} \quad (10-15)$$



## 10.4 Obliczenie strat/zysków ciepła przez przenikanie

a) Straty/zyski ciepła przez przenikanie poprzez zewnętrzne przegrody

Założenie:

$$Q_z = 0; Q_s = 0 \quad (10-16)$$

Straty ciepła w sezonie grzewczym, przez przenikanie przez przegrody do powietrza zewnętrznego oblicza się ze wzoru:

$$Q_z [kJ] = Q_z + H_{zi} T_{rozn} t \quad (10-17)$$

w przypadku, gdy ( $T_{zsr} < T_{wzred}$ ).

Gdzie:

$Q_z$  – straty ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne [W]

t – czas trwania obliczeń (t=24h)

Zyski ciepła w sezonie ogrzewczym, przez przenikanie przez przegrody do powietrza wewnętrznego oblicza się ze wzoru:

$$Q_s [kJ] = Q_s + H_{si} T_{rozn} t \quad (10-18)$$

w przypadku, gdy ( $T_{zsr} > T_{wzred}$ ).

Gdzie:

$Q_s$  – zyski ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne [W]

b) Straty/zyski ciepła przez przenikanie przez przegrody przezroczyste

Założenie:

$$Q_{Tostr} = 0; Q_{Tozysk} = 0 \quad (10-19)$$

Straty ciepła w sezonie ogrzewczym przez przenikanie przez przegrody przezroczyste oblicza się ze wzoru:

$$Q_o [kJ] = Q_o + H_{zo} T_{rozn} t \quad (10-20)$$

w przypadku, gdy  $(T_{zsr} < T_{wzred})$ .

Gdzie:

$Q_o$  –straty ciepła przez przenikanie przez przegrody przezroczyste [W]

Zyski ciepła w sezonie grzewczym od promieniowania słonecznego przez przegrody przezroczyste oblicza się ze wzoru:

$$Q_s [kJ] = Q_s + H_{so} T_{rozn} t \quad (10-21)$$

w przypadku, gdy  $(T_{zsr} > T_{wzred})$ .

Gdzie:

$Q_s$  –zyski ciepła przez przenikanie przez przegrody przezroczyste [W]

c) Straty ciepła przez przenikanie przez przegrody w kontakcie z gruntem

Założenia:

$$Q_z = 0 \quad (10-22)$$

$$T_{sr1} = 1 \quad (10-23)$$

Gdzie:

$T_{sr1}$ -Miesiąc o najniższej temperaturze zewnętrznej

Straty ciepła w sezonie grzewczym przez przenikanie przez podłogę pomieszczeń ogrzewanych do gruntu oblicza się ze wzoru:

$$Q_{pg} [Wh] = H_{pg} (T_{wzred} - T_{zsr}) \quad (10-24)$$

Gdzie:

$H_{pg}$  – Współczynnik przenikania ciepła przez powierzchnie gruntu (odpowiednik statycznego współczynnika przewodzenia ciepła przez powierzchnie gruntu, LS wg DIN EN ISO 13370),  
Współczynnik przewodzenia ciepła gruntu  $\lambda$  jest równy wartości 2,0 W/(m\*K)

## 10.5 Straty/zyski ciepła

### a) Zyski/straty ciepła wentylacyjne

Straty ciepła w sezonie grzewczym na podgrzanie powietrza wentylacyjnego oblicza się ze wzoru:

$$Q_v [Wh] = H_{ve} T_{rozn} t \quad (10-25)$$

w przypadku, gdy  $(T_{zsr} < T_{wzred})$ .

Gdzie:

$Q_v$  – Straty wentylacyjne ciepła [Wh]

Zyski ciepła w sezonie grzewczym od powietrza wentylacyjnego oblicza się ze wzoru:

$$Q_{ve} [Wh] = H_{ve} T_{rozn} t \quad (10-26)$$

w przypadku, gdy  $(T_{zsr} > T_{wzred})$ .

Gdzie:

$Q_{ve}$  – Zyski ciepła przez wentylację [Wh]

### b) Zyski/straty ciepła od promieniowania słonecznego

Założenie:

$$Q_s = 0 \quad (10-27)$$

Zyski ciepła w sezonie grzewczym od promieniowania słonecznego przez przegrody przezroczyste oblicza się ze wzoru:

$$Q_s [Wh] = Q_s + F_o A_{oi} T_{Ri} S_i t \quad (10-28)$$

Gdzie:

$Q_s$  – zyski ciepła od promieniowania słonecznego [kWh]

$F_o$  – współczynnik redukcyjny dla ram okien, który odpowiada stosunkowi powierzchni przenikającej do całkowitej powierzchni przegród przezroczystych,  $A_{oi}$ : w przypadku, gdy żadne dokładne wartości nie są znane, można założyć, że  $F_o = 0,7$  [-]

$A_{oi}$  – pole powierzchni przegród przezroczystych w ościeży i-tej orientacji [m<sup>2</sup>]

$T_{Ri}$  – współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego o i-tej orientacji [-]

$S_i$  - suma promieniowania całkowitego na płaszczyznę pionową o i-tej orientacji [Wh/m<sup>2</sup>]

c) Zyski ciepła od źródeł wewnętrznych

Dla elementów ogrzewanych, wewnętrzne zyski ciepła uzyskiwane są od osób, urządzeń elektrycznych i oświetlenia oblicza się ze wzoru:

$$Q_i [Wh] = Q_{i,o} + Q_{i,u} + Q_{i,os} \quad (10-29)$$

Gdzie:

$Q_{i,o}$  – wewnętrzne zyski ciepła od osób [Wh]

$Q_{i,u}$  - wewnętrzne zyski ciepła od urządzeń elektrycznych [Wh]

$Q_{i,os}$  - wewnętrzne zyski ciepła od oświetlenia [Wh]

$$Q_i [Wh] = \left( Q_{i,og} T_{uzyt} + Q_{i,noc} (24 - T_{uzyt}) \right) t A_{zi} \quad (10-30)$$

Gdzie:

$Q_i$  – wewnętrzne zyski ciepła [Wh]

$Q_{i,og}$  - wszystkie zyski ciepła podczas trybu ogrzewania [Wh]

$T_{uzyt}$  – czas użytkowania [h]

$Q_{i,noc}$  – wszystkie zyski ciepła podczas godzin nocnych [Wh]

$A_{zi}$  – pole powierzchni i-tej ściany zewnętrznej elementu [m<sup>2</sup>]

$t$  – czas trwania obliczeń (t=24h)

## 10.6 Bilans miesięczny

a) Bilans wstępny

Całkowita strata ciepła przestrzeni ogrzewanej obliczana jest ze wzoru:

$$Q_{zc} [Wh] = Q_z + Q_o + Q_v \quad (10-31)$$

Gdzie:

$Q_z$  – strata ciepła przestrzeni ogrzewanej przez przenikanie, poprzez przegrody zewnętrzne [Wh]

$Q_o$  - strata ciepła przestrzeni ogrzewanej przez przenikanie, poprzez przegrody przeźroczyste [Wh]

$Q_v$  – wentylacyjna strata ciepła przestrzeni ogrzewanej [Wh]

Całkowity zysk ciepła przestrzeni ogrzewanej obliczany jest ze wzoru:

$$Q_{sc} [Wh] = Q_s + Q_{so} + Q_{sv} + Q_i \quad (10-32)$$

Gdzie:

$Q_s$  – zysk ciepła przestrzeni ogrzewanej przez przenikanie, poprzez przegrody zewnętrzne [Wh]

$Q_{so}$  - zysk ciepła przestrzeni ogrzewanej przez przenikanie, poprzez przegrody przezroczyste [Wh]

$Q_{sv}$  – zysk ciepła od powietrza wentylacyjnego [Wh]

$Q_i$  – wewnętrzne zyski ciepła [Wh]

b) Stopień wykorzystania ogrzewania

$$a = 1 + \frac{\tau}{16} \quad (10-33)$$

Gdzie:

a – parametr numeryczny [-]

$$\gamma = \frac{Q_s}{Q_z} \quad (10-34)$$

Gdzie:

$\gamma$  - stosunek zysków ciepła do ich strat [-]

$$\eta = \frac{(1 - \gamma^a)}{(1 - \gamma^{a+1})} \quad (10-35)$$

Gdzie:

$\eta$  – stopień wykorzystania [-]

c) Całkowity bilans ogrzewania

$$Q_h [kWh] = Q_z - \eta Q_z \quad (10-36)$$

Gdzie:

$Q_h$  – Zapotrzebowanie energii cieplnej na ogrzewanie [kWh]