

SUMMARY IN POLISH (*STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM*)

Rozprawa doktorska zatytułowana „*Urban-scale energy modelling of some residential energy flexible buildings clusters in Poland*” (pol. "Modelowanie energetyczne w skali urbanistycznej wybranych zespołów budynków mieszkalnych o adaptowalnych źródłach energii") skupia się na zagadnieniach związanych z modelowaniem energetycznym obszarów miejskich (ang. *Urban Energy Modelling*) za pomocą autorskiego programu komputerowego *TEAC (Computational Tool for Energy Efficiency Analysis of an Energy Cluster)*. W rozprawie szczegółowo omówiono strukturę tego programu oraz algorytm działania jego poszczególnych modułów. Przeprowadzono także szereg analiz dotyczących aspektów energetycznych, ekonomicznych oraz środowiskowych obszarów mieszkalnych w Polsce. W rozprawie przedstawiono zastosowanie programu *TEAC* na przykładach tzw. Budowlanych Klastrow Energii (ang. *Building Energy Clusters*), które składać się mogą z setek domów jednorodzinnych. Każdy z zaprezentowanych przykładów przedstawia inny aspekt problematyki badawczej. Dodatkowo, w rozprawie omówiono zastosowanie programu *TEAC* do analizy rzeczywistych obszarów mieszkalnych zlokalizowanych w Łodzi.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, spisu tabel i rysunków, jak również 9 załączników. Rozdział **1** zawiera wprowadzenie w tematykę niniejszej rozprawy. W rozdziale tym przedstawiono główne cele pracy oraz zdefiniowano tezy badawcze, o poniższym brzmieniu:

- możliwe jest wykorzystanie zaawansowanych symulacji energetycznych w celu prognozowania profili energetycznych pojedynczych budynków, jak również całych obszarów zabudowanych,
- paradygmat Klastra Energii (ang. *Energy Cluster*) jest właściwym podejściem pozwalającym poprawić profil energetyczny obszaru o zabudowie jednorodzinnej,
- możliwe jest prognozowanie zapotrzebowania na energię analizowanego obszaru mieszkalnego wykorzystując podstawowe dane go opisujące (zespół budynków).

Rozdział **2** przedstawia wstęp teoretyczny do tematyki niniejszej rozprawy, uwzględniając różne aspekty dotyczące modelowania energetycznego mieszkalnych obszarów miejskich (ang. *Urban Building Energy Modelling*). W p. **2.1** omówiono aktualny przegląd literatury dotyczący tematyki niniejszej rozprawy. W podrozdziałach **2.2** oraz **2.3** omówiono odpowiednio stan polskiego systemu elektroenergetycznego oraz sektora gospodarstw domowych. Strategie dotyczące poprawy efektywności energetycznej budynków zostały omówione w p. **2.4**, a tematyka ich rozwoju zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju (ang. *Sustainable Development*) została omówiona w p. **2.5**. Paradygmat Klastra Energii jako nowoczesnego podejścia do analizy obszarów składających się z obiektów budowlanych został opisany w p. **2.6**. Przegląd aktualnie dostępnych programów

komputerowych, które mogą być zastosowane do analiz energetycznych pojedynczych budynków, jak również całych obszarów miejskich przedstawiono w p. 2.7. W kolejnej części (p. 2.8) omówiono zastosowanie sztucznej inteligencji (ang. *Artificial Intelligence*) w analizach energetycznych budynków.

W rozdziale 3 opisano przyjęte założenia oraz wykonane analizy. Ta część pracy rozpoczyna się od prezentacji procedury wykorzystanej w ramach wykonanych analiz – procedurę tę przedstawiono w p. 3.1. Wyróżnić w niej można czynności wstępne (m.in. przygotowanie danych wejściowych), których głównym celem było zdefiniowanie sztucznej sieci neuronowej (ang. *Neural Network*) wykorzystywanej do predykcji zapotrzebowania na energię grzewczą. Proces uczenia sieci został zaprezentowany w p. 3.6. Czynności wstępne wykonane były tylko raz, natomiast właściwa analiza (tj. wszelkie obliczenia dot. Klastrow Energii) wykonywane są dla każdego analizowanego przypadku. Zebrane informacje oraz wyniki posłużyły jako dane wejściowe do opracowania programu *TEAC*, który został szczegółowo omówiony w p. 3.7. Wykorzystanie programu *TEAC* do analiz obszaru mieszkalnego, stanowiącego Klaster Energii, został zaprezentowany na dwóch przykładach w p. 3.8. Przegląd założeń, które zostały przyjęte podczas opracowywania programu *TEAC*, jak również na potrzeby przeprowadzonych w rozprawie analiz, zostały opisane w pozostałych częściach tego rozdziału. Założenia ogólne pracy opisano w p. 3.2, natomiast wykorzystane dane klimatyczne omówiono w p. 3.3. Opis polskich referencyjnych domów jednorodzinnych (ang. *Representative Single-Family Houses*) zaprezentowano w p. 3.4, a opis proponowanych modernizacji tych budynków w p. 3.5.

Rozdział 4 poświęcono przedstawieniu przykładów obliczeniowych dotyczących Klastrow Energii obszarów mieszkalnych, wykonanych za pomocą programu *TEAC*. Zaprezentowane przykłady miały na celu pokazanie możliwości opracowanego programu; każdy z nich dotyczył innej tematyki badawczej. Pierwszy przykład (p. 4.1) dotyczył obszaru 2500 (50 x 50) działek, z których każda działka była zajęta; analizowany obszar składał się z 2500 domów jednorodzinnych. Dobór budynków był losowy – dotyczyło to zarówno typu budynku, jak również ich orientacji. Ten przykład prezentował wyniki dot. zużycia energii analizowanego Klastera Energii, przede wszystkim przy użyciu krzywych obciążenia sieci (ang. *Load Duration Curves*). Tego typu analizy pozwalają na sprawdzenie, a następnie dobór modernizacji budowlanych, które prowadzą do zwiększenia bezpieczeństwa lokalnej sieci elektroenergetycznej. Rozpatrując obszar mieszkalny jako Klaster Energii możliwe jest zarządzanie obciążeniami szczytowymi, jak również lepsze zarządzanie zapotrzebowaniem na energię tego obszaru. Drugi przykład (p. 4.2) dotyczy Klastera Energii składającego się z 2500 domów jednorodzinnych, jest to osiedle zdefiniowane na obszarze 50 na 50 działek, o strukturze miasta z wyraźnym centrum. Analizy w ramach tego przykładu skupione są na aspektach ekonomicznych oraz środowiskowych, możliwych do oszacowania przy użyciu programu *TEAC*. W ramach analizy

porównano dwie lokalizacje w Polsce, Rzeszów i Szczecin, a wśród rozpatrywanych modernizacji przeanalizowano m.in. wykorzystanie Odnawialnych Źródeł Energii. Przeprowadzona analiza ekonomiczna zakładała weryfikację opłacalności finansowej proponowanych wariantów modernizacyjnych dla analizowanego obszaru (opis wykorzystanych technik znajduje się w podrozdziałach 2.5 oraz 3.7). Przeprowadzona analiza środowiskowa obejmuje oszacowanie emisji gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gasses*), wynikających z zapotrzebowania na energię rozpatrywanego klastra. Zweryfikowano, że oprogramowanie *TEAC* jest odpowiednim narzędziem do analiz ekonomicznych i ekologicznych obszarów typu Klaster Energii. Trzeci przykład (p. 4.3) przedstawia wyniki analiz w formie map (tzw. *mapping*). Rozpatrywany obszar jest Klastrem Energii, składającym się z 2189 domów jednorodzinnych; analizowane osiedle obejmuje obszar 50 na 50 działek (założono, że niektóre z nich są puste) i zostało zdefiniowane korzystając z predefiniowanej siatki ulic. Zestawiono wyniki uzyskane dla dwóch lokalizacji, odpowiednio Wrocławia i Białegostoku. Zaprezentowane mapy przedstawiają wyniki analizy energetycznej i środowiskowej badanego obszaru, porównując stan przed i po modernizacji budynków wchodzących w skład analizowanego osiedla. Tego typu analizy posłużyć mogą do wyznaczenia stref analizowanego klastra, które wykazują wysoki potencjał poprawy efektywności energetycznej. Dodatkowo, możliwe jest wyznaczenie obszarów, dla których proponowane modernizacje są najkorzystniejsze finansowo, jak również pod kątem ochrony środowiska (redukcji emisji gazów cieplarnianych). Ostatni czwarty przykład (p. 4.4) jest osiedlem o kształcie niejednorodnym, zlokalizowanym w Warszawie. Analizowane osiedle wpisane jest w obszar 50 na 80 działek, z których tylko 1999 jest zajętych. W tym przykładzie wykonano kompleksową analizę Klastra Energii przy użyciu programu *TEAC*. Dzięki analizie tego typu możliwa jest kompleksowa ocena rozpatrywanego osiedla domów jednorodzinnych, sprawdzająca aspekty energetyczne, środowiskowe, jak również ekonomiczne.

W rozdziale 5 rozprawy przedstawiono wyniki dla dwóch rzeczywistych osiedli mieszkaniowych, zlokalizowanych w Łodzi, o których założono, że stanowią Klastry Energii. Analizowane klastry rozpatrywać można jako „*studium przypadku*”, gdyż ich definicja opierała się na zdjęciach satelitarnych rzeczywistych obszarów mieszkalnych. Pierwszy z nich (p. 5.1) jest małym fragmentem typowej dzielnicy mieszkaniowej, składającej się z domów jednorodzinnych, natomiast drugi (p. 5.2) jest rozległym obszarem podmiejskim, gdzie budynki mieszkalne (przede wszystkich domy jednorodzinne) stanowią zdecydowaną większość zabudowy lokalnej. Oba rozpatrywane Klastry Energii analizowano pod kątem ich transformacji w obszary wysoce efektywne i elastyczne energetycznie, umożliwiające częściową niezależność energetyczną (ang. *Energy Flexible Building Cluster*). W ramach przeprowadzonych analiz zastosowano wszystkie strategie omówione w rozdziale 4. Dodatkowo, założono zastosowanie metody pozwalającej na zarządzanie zapotrzebowaniem na energię,

wykorzystując w tym celu magazyny energii elektrycznej. Ponadto, stosując metody inteligentnego rozliczania zużycia energii elektrycznej (ang. *smart-metering*) możliwe jest bardziej efektywne i korzystniejsze finansowo zarządzanie zapotrzebowaniem energii analizowanych klastrow. Rozwój tego typu obszarów, składających się z wysoce energooszczędnych domów, wykorzystujących lokalną produkcję energii z OZE są niezwykle istotne dla rozwoju zrównoważonych obszarów miejskich. Wykazano, że program *TEAC* umożliwia przeprowadzenie tego typu analiz dla rzeczywistych obszarów mieszkalnych w Polsce.

Rozdział 6 zawiera wnioski i podsumowanie z analiz przeprowadzonych w rozprawie. Główne podsumowanie odnosi się do tez postawionych we wstępie pracy. Po pierwsze wykazano, że możliwe i słuszne jest wykorzystanie zaawansowanych programów symulacyjnych do analiz energetycznych pojedynczych budynków, jak również grupy obiektów mieszkalnych. Po drugie, przeprowadzono szereg analiz potwierdzających, że modelowanie energetyczne zabudowanych obszarów miejskich jest zagadnieniem niezwykle złożonym, które z powodzeniem można stosować przy analizie Klastrow Energii. Po trzecie, na potrzeby niniejszej pracy opracowano program *TEAC*, służący do analiz Klastrow Energii, składających się z osiedli mieszkalnych, w skład których wchodzi polskie reprezentatywne domy jednorodzinne. Program *TEAC* oraz wszystkie jego możliwości zostały sprawdzone w ramach niniejszej rozprawy wykazując, iż jest on narzędziem odpowiednim do analiz obszarów mieszkalnych w Polsce. Dodatkowo, podczas wykonywania opisanych analiz wyciągnięto inne ciekawe wnioski, które zostały podsumowane w tym rozdziale.

Rozdział 7 zawiera krótki opis planowanych przyszłych badań. Większość z nich skupia się na ulepszeniu programu *TEAC*, tak aby możliwe było jego rozpowszechnienie. Wśród najważniejszych zadań wymienić należy wprowadzenie graficznego interfejsu programu (ang. *Graphical User Interface*), jak również dodanie modułu pozwalającego na korzystanie z systemu informacji geograficznej GIS (ang. *Geographical Information System*).

Rozprawa zawiera 9 załączników z szeregiem dodatkowych informacji. W **Załączniku 1** zestawiono podstawowe informacje dot. analizowanych referencyjnych domów jednorodzinnych w Polsce. W **Załączniku 2** oraz **Załączniku 3** opisano założenia wykorzystane przy definiowaniu budynków poddanych analizie w ramach niniejszej rozprawy. Modele numeryczne domów jednorodzinnych zostały zdefiniowane w programie *Energy Plus*; zawiera je **Załącznik 4** oraz **Załącznik 5**. Przyjęte schematy najbliższego otoczenia analizowanych budynków (mające na celu uwzględnienie wpływu zacienienia) zostały pokazane w **Załączniku 6**. W **Załączniku 7** podano skrypt zdefiniowanej sieci neuronowej, służącej do przewidywania zapotrzebowania na energię cieplną budynku jednorodzinne, wchodzącego w skład Klastra Energii. W **Załączniku 8** pokazano, w jaki sposób

zdefiniowano przykładowe obszary typu Klaster Energii (omówione w p. **3.8**) przy użyciu programu *TEAC*. Ponadto, w **Załączniku 9** podano dodatkowe wyniki dla przykładów omówionych w rozdziale **4**.