

Anna Bulińska

**Analiza wykorzystania generowanego
metabolicznie ditlenku węgla
jako znacznika gazowego
do określania wymiany powietrza
w pomieszczeniach**

Rozprawa doktorska

Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
Gliwice, Polska, 2011



Autor:

Anna Bulińska
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania
Konarskiego 20
44-100 Gliwice
Polska
e-mail: *anna.bulinska@polsl.pl*

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Popiołek
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania
Konarskiego 20
44-100 Gliwice
Poland
e-mail: *zbigniew.popiolek@polsl.pl*

Angielski tytuł pracy doktorskiej:

**Analysis of the application of metabolic carbon dioxide
as a tracer gas in determination
of air exchange rate in rooms**

Praca finansowana przez
Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego
w ramach grantu N N523 414935

©Copyright 2011 by Anna Bulińska

System L^AT_EX 2_ε.
Printed from files provided by author.

Gosi i Zbyszkowi

Spis treści

Podziękowania	6
Wykaz oznaczeń	7
1 Wstęp	10
1.1 Wprowadzenie	10
1.2 Istniejący stan wiedzy	12
1.3 Cel i zakres pracy	17
2 Metodyka badania wymiany powietrza w budynkach z wentylacją naturalną	19
2.1 Wentylacja naturalna w budynkach mieszkalnych	19
2.1.1 Mechanizmy wentylacji naturalnej	19
2.1.2 Uregulowania normatywne wymaganej intensywności wentylacji	21
2.2 Badania wymiany powietrza w budynkach metodą gazów znacznikowych	23
2.2.1 Metoda obliczeń	23
2.2.2 Wytyczne prowadzenia badań	26
2.3 Wykorzystanie metabolicznego ditlenku węgla jako gazu znacznikowego	27
2.3.1 Oddziaływanie ditlenku węgla na organizm człowieka	27
2.3.2 Ditlenek węgla jako gaz znacznikowy	29
3 Pomiary stężenia metabolicznego ditlenku węgla w wybranych obiektach	31
3.1 Metoda pomiarów	32
3.2 Wyniki pomiarów	37
3.2.1 Wyniki pomiarów rozprzestrzeniania się metabolicznego ditlenku węgla dla potrzeb walidacji modelu numerycznego	37
3.2.2 Wyniki pomiarów stężenia ditlenku węgla w mieszkaniach dla określenia intensywności wentylacji	39
4 Modelowanie matematyczne wymiany powietrza	44
4.1 Model matematyczny	44
4.2 Algorytm Levenberga-Marquardta rozwiązania zadania odwrotnego	47
4.3 Empiryczna weryfikacja opracowanego modelu	49
4.4 Ocena dokładności rozwiązania zadania odwrotnego	51
4.5 Ocena intensywności wentylacji w analizowanych budynkach mieszkalnych	52
4.5.1 Ocena intensywności wentylacji w mieszkaniu I w budynku jednorodzinym	52

4.5.2	Ocena intensywności wentylacji w mieszkaniu II w budynku wielorodzinnym	54
4.6	Wnioski do rozdziału	56
5	Analiza numeryczna rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu	60
5.1	Numeryczne modelowanie przepływów powietrza w pomieszczeniach	60
5.1.1	Równania zachowania	61
5.1.2	Równania modelu turbulencji	63
5.1.3	Model oddychającego człowieka	64
5.1.4	Metoda rozwiązywania układu równań	66
5.2	Dwuwymiarowy model numeryczny pomieszczenia	66
5.2.1	Analiza wpływu siatki dyskretyzacji na wyniki modelowania	66
5.2.2	Analiza wpływu sposobu modelowania nawiewu powietrza przez otwory na wyniki obliczeń numerycznych	69
5.3	Trójwymiarowy model numeryczny pomieszczenia	76
5.3.1	Model geometryczny	76
5.3.2	Siatka dyskretyzacji	77
5.3.3	Warunki brzegowe i początkowe	82
5.3.4	Wyniki obliczeń numerycznych	83
5.3.4.1	Analiza wpływu wielkości elementów siatki dyskretyzacji na wyniki obliczeń numerycznych	84
5.3.4.2	Porównanie wyników modelowania numerycznego z eksperymentem	89
5.3.4.3	Analiza wpływu zmiany zawartości ditlenku węgla w wydychanym powietrzu	90
5.3.4.4	Wpływ zastosowanego modelu oddychania	90
5.3.4.5	Wpływ gorącej powierzchni grzejnika	95
5.3.4.6	Wpływ przyjętej geometrii otworu nawiewnego	95
5.3.5	Poszukiwanie reprezentatywnych obszarów dla pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu	101
5.3.6	Wnioski do rozdziału	112
6	Podsumowanie i wnioski	114
	Bibliografia	117

Podziękowania

Promotorowi niniejszej pracy dziękuję za wskazanie jej tematu oraz opiekę naukową. Dziękuję Mężowi za pomoc w czasie pomiarów, liczne naukowe dyskusje oraz za wsparcie. Tacie dziękuję za pomoc przy redakcji niniejszej pracy. Składam również podziękowania Piotrowi Koprowi za pomoc w przygotowaniu rysunków mieszkania. Mojej rodzinie dziękuję za pomoc i wsparcie w codziennych obowiązkach, które pozwoliły mi na dokończenie niniejszej pracy.

Autorka

Wykaz oznaczeń

Oznaczenia łacińskie

A_D	powierzchnia DuBois, ciała ludzkiego ,m ²
A	powierzchnia, m ²
C	stężenie, m ³ /m ³
c_v	ciepło właściwe, J/(kg · K)
C	wektor stężeń, m ³ /m ³
D	współczynnik dyfuzji, kg/m·s
e	energia wewnętrzna, J/kg
F	całkowita liczba nieznanych strumieni powietrza
g	przyspieszenie ziemskie, m/s ²
j_i	wektor gęstości strumienia masy i-tego składnika, kg/(m ² ·s)
J	macierz wrażliwości
k	energia kinetyczna turbulencji, m ² /s ²
L	liczba strumieni estymowanych procedurą optymalizacyjną
\dot{m}	strumień masowy, kg/s
M	masa molowa, kg/mol
n	liczba wymian powietrza, h ⁻¹
N	liczba stref
p	ciśnienie, Pa
P	całkowita liczba pomiarów
R_q	współczynnik respiracyjny

S	wartość funkcji celu
S_ϕ	człon źródłowy równania
t	czas, s
T	temperatura, K
\mathbf{u}	wektor prędkości, m/s
u, v, w	składowa x, y, z wektora prędkości, m/s
u_i	fluktuacja i-tej składowej prędkości wokół wartości średniej, m/s
$\dot{\mathbf{V}}$	wektor strumieni powietrza, m ³ /h
\dot{V}	strumień objętościowy, m ³ /h
V	objętość, m ³
x, y, z	współrzędne globalne
Y	udział masowy
z	udział molowy

Oznaczenia greckie

ϵ	dokładność obliczeń algorytmu Levenberga-Marquardta
ϕ	wielkość skalarna
φ	wilgotność względna, %
λ	współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m · K)
μ	dynamiczny współczynnik lepkości molekularnej, Pa · s
μ	parametr regularyzacyjny algorytmu Levenberga-Marquardta
Ω	macierz jednostkowa
Γ	współczynnik dyfuzji, kg/m·s
ρ	gęstość, kg/m ³
τ_t	tensor naprężeń turbulentnych

Indeksy

e	dotyczy emisji CO ₂ od ludzi
-----	---

eff efektywny

gz gaz znacznikowy

in wewnętrzny

O_2, CO_2, H_2O, N_2 indeks dolny

out wypływający ze strefy

s stan nasycenia

su dopływający do strefy

t turbulentny

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Podstawą dla zapewnienia dobrej jakości powietrza w pomieszczeniu jest skutecznie działająca wentylacja. Ma ona za zadanie doprowadzenie do pomieszczenia odpowiedniej ilości świeżego powietrza jak również usunięcie zanieczyszczonego powietrza wewnętrznego. Istnieje wiele sposobów wentylacji pomieszczeń od wentylacji naturalnej po w pełni zorganizowaną wentylację mechaniczną i klimatyzację. Naturalna wentylacja bazuje na infiltracji powietrza przez nieszczelności w stolarze okiennej i drzwiowej wykorzystując jednocześnie naturalne przewietrzanie pomieszczeń przez otwieranie okien. Powietrze usuwane jest z pomieszczeń najczęściej przewodami wentylacyjnymi („wentylacja grawitacyjna”) wykorzystującymi zjawisko waporu termicznego [1].

Pomimo większych możliwości regulowania parametrów powietrza wewnętrznego jakie daje wentylacja mechaniczna pomieszczeń to wentylacja naturalna jest najczęściej stosowanym systemem wentylacji w budynkach mieszkalnych zarówno już istniejących jak i nowo wznoszonych. Jak pokazują badania jest ona również częściej wybierana przez mieszkańców jako bardziej przyjazna, cicha, energetycznie efektywna i zdrowsza w porównaniu z wentylacją mechaniczną [2].

W przeszłości, gdy budynki były dużo bardziej nieszczelne a energia tania uważano, że ilość powietrza napływająca do pomieszczeń przez infiltrację, wspomagana dodatkowo otwieraniem okien była wystarczająca dla zapewnienia warunków komfortu cieplnego i odpowiednich warunków higienicznych w pomieszczeniach [3]. Zagadnieniom wentylacji pomieszczeń nie poświęcano wówczas zbyt wiele uwagi. Kryzys energetyczny w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia spowodował jednak zmianę polityki energetycznej na świecie a w konsekwencji wpłynął również na konieczność zwiększenia efektywności cieplnej budynków. Przepisy prawne ograniczające zużycie energii w sektorze mieszkaniowym spowodowały rozwój nowych technologii budowlanych i inżynierii materiałowej. Pozwoliło to na budowę nowych energooszczędnych budynków jak również termomodernizację obiektów już istniejących. Zmieniając potrzeby cieplne budynków nie zawsze uwzględniano zmieniające się w nich potrzeby wenty-

lacyjne. Doprowadziło to do znacznego uszczelnienia budynków i ograniczenia dróg infiltracji powietrza a co zatem idzie obniżenia ilości świeżego powietrza dostarczanego do budynku.

Ograniczona wymiana powietrza a przez to wzrost stężenia zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach stał się przyczyną pogorszenia warunków higieniczno-zdrowotnych w budynkach [4, 5]. Ograniczone usuwanie zanieczyszczeń i wilgoci z powietrza wewnętrznego, sprzyja rozwojowi mikroorganizmów, grzybów i pleśni oraz niszczeniu materiałów budowlanych. Jest również przyczyną pojawiających się objawów chorobowych u mieszkańców takich jak podrażnienie oczu, nosa i gardła, wysuszenie błon śluzowych i skóry, ogólne zmęczenie, bóle głowy i kłopoty z koncentracją, które ustępują po opuszczeniu pomieszczenia. Objawy te zostały zakwalifikowane przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) jako „objawy chorego budynku” (SBS - Sick Building Syndrome) [5, 6].

Pierwsze lata doświadczeń zdobytych po wprowadzeniu przepisów ograniczających zużycie energii w sektorze mieszkaniowym pokazały, że nie można oszczędzać energii kosztem zdrowia ludzi. Przypomniano sobie wówczas, że nadrzędną funkcją budynku jest ochrona jego mieszkańców przed czynnikami środowiska zewnętrznego oraz zapewnienie zdrowego środowiska wewnętrznego. Dało to początek nowemu podejściu do budynku jako obiektu „energetycznie efektywnego” („energy efficient”) a co zatem idzie wpłynęło na rozwój nowych technologii w projektowaniu wentylacji naturalnej i metod pomiarowych niezbędnych na etapie eksploatacji budynku [2].

Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia również polskie budownictwo przeżywa intensywny rozwój związany z wprowadzaniem nowych energooszczędnych technologii budowlanych. Podobnie jak w innych krajach również i u nas pojawiły się problemy z jakością środowiska wewnętrznego oraz problemami zdrowotnymi mieszkańców [4, 7, 8]. Poprawa skuteczności działania wentylacji w budynkach wymaga z jednej strony wprowadzania nowych technologii na etapie projektowania wentylacji naturalnej [2], z drugiej strony potrzebne są metody pomiarowe pozwalające na ocenę intensywności wymiany i przepływów powietrza w obiektach już istniejących. Większość dostępnych metod pomiarowych wymaga stosowania drogiej i skomplikowanej aparatury. Najbardziej popularne metody znaczników gazowych wymagają wyłączenia budynków z ich codziennej eksploatacji. Ogranicza to możliwości ich stosowania szczególnie w zamieszkałych budynkach.

Motywacją do podjęcia tematu było poszukiwanie nowych metod, które pozwolą na ocenę intensywności wymiany powietrza w oparciu o tanie i proste pomiary w budynkach podczas ich codziennej eksploatacji. W tym celu można wykorzystać generowany metabolicznie ditlenek węgla. Pomiary stężenia metabolicznego ditlenku węgla prowadzone w czasie normalnego użytkowania pomieszczeń nie wymagają wprowadzania dodatkowych znaczników gazowych do pomieszczenia, a w efekcie nie wymagają stosowania skomplikowanej aparatury pomiarowej.

Wydechany w procesie oddychania ditlenek węgla jest powszechnie stosowany jako wskaźnik jakości powietrza wewnętrznego [7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Wykorzystywany jest również do określania intensywności wentylacji w pomieszczeniach [16, 17, 18]. Trudności w stosowa-

niu tej metody wynikają przede wszystkim z dużej niepewności zmierzonych wartości stężenia ditlenku węgla, które zależą od miejsca próbkowania w pomieszczeniu i dokładności czujników pomiarowych. Dokładność obliczeń wymiany powietrza zależy również od oszacowanej emisji ditlenku węgla od człowieka. Jednak zalety wynikające z wykorzystania naturalnego gazu znacznikowego powodują coraz większe zainteresowanie tą metodą.

1.2 Istniejący stan wiedzy

Znajomość przepływów i wymiany powietrza w budynku stanowi niezbędne źródło wiedzy na etapie projektowania i w trakcie jego eksploatacji. Potrzeba określania przepływów powietrza w budynkach przyczyniła się do opracowania wielu nowych metod badawczych i pomiarowych wykorzystujących najnowsze narzędzia obliczeniowe i techniki pomiarowe. Metody badania przepływów powietrza w budynkach bazują na modelowaniu zjawisk przepływu ciepła i masy [2, 11, 19, 20, 21, 22].

Współczesne metody badania intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach można podzielić na metody wykorzystujące modele teoretyczne oraz metody pomiarowe. Wśród modeli teoretycznych do określania intensywności wymiany powietrza w budynkach z wentylacją naturalną wykorzystywane są zarówno proste modele empiryczne jak i skomplikowane modele numerycznej mechaniki płynów (CFD - Computational Fluid Dynamics). Allard [2] wprowadza podział na cztery główne grupy modeli: modele empiryczne, modele sieciowe (network models), modele strefowe (zonal models) i modele CFD.

Modele empiryczne budowane są na bazie danych eksperymentalnych. Traktują wnętrze budynku jako pojedynczą strefę o jednorodnych parametrach powietrza. Wykorzystywane są głównie na wstępnym etapie projektowania budynku w celu określenia infiltracji powietrza do budynku. Stanowią jedynie pierwsze przybliżenie dla wyznaczenia ilości powietrza wymienianego w budynku. Przykłady modeli empirycznych można znaleźć między innymi w normie brytyjskiej BS-5925 [19] i amerykańskim poradniku ASHRAE Fundamentals [23]. Przykładowo norma brytyjska podaje formuły do obliczeń całkowitej infiltracji powietrza do budynku w wyniku działania naporu wiatru i wyporu termicznego. Modele empiryczne zostały między innymi omówione w książce Allarda [2] oraz w publikacjach [24, 25].

Traktowanie całego budynku jako jednej strefy nie pozwala jednak na uwzględnienie wewnętrznych przepływów powietrza pomiędzy pomieszczeniem i otoczeniem. Współczesne wymagania odnośnie komfortu cieplnego i jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach wymagają określenia międzystrefowych przepływów powietrza. Do opisu międzystrefowych przepływów powietrza w budynku najczęściej wykorzystuje się modele sieciowe i modele strefowe. Modele te mogą być rozpatrywane jako jednostrefowe i wielostrefowe.

Modele sieciowe budowane są jako sieci połączonych z sobą punktów (węzłów). Każde pomieszczenie reprezentowane jest przez pojedynczy punkt (węzeł). Połączenia pomiędzy punktami stanowią ścieżki przepływu powietrza wraz z oporami które występują na drodze przepływu przez okna drzwi i przewody wentylacyjne [2, 11, 19, 23]. Pozwalają one określić

kierunek i ilość powietrza wymienianego pomiędzy strefami jak również rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Modele sieciowe wykorzystują informację o różnicy ciśnienia między węzłami wynikającej z oddziaływania wiatru i różnicy temperatur na tym elemencie. Przyjmuje się, że znana jest różnica ciśnień dla zewnętrznych węzłów łączących budynek z otoczeniem natomiast w modelu obliczana jest różnica ciśnienia pomiędzy węzłami wewnętrznymi. Istnieje szereg programów komputerowych do obliczeń międzystrefowych przepływów powietrza z wykorzystaniem modeli sieciowych między innymi CONTAM [26], COMIS [27, 28], BREEZE [29], AIOLIS [2]. W literaturze krajowej przykłady programów bazujących na modelach wielostrefowych (sieciowych) można znaleźć w pracach Nantki [30] i Baranowskiego [31]. Allard [2] porównuje wyniki obliczeń symulacyjnych wykonanych na bazie programów sieciowych takich jak COMIS, ESP, PASSPORT-AIR, AIRNET, BREEZE. Uzyskuje on zbliżone wyniki dla większości badanych programów. Przegląd różnych modeli sieciowych i strefowych, ich rozwój na przestrzeni ostatnich lat, a także różne sposoby ich zastosowania zostały szeroko omówione w publikacjach Megri i Axley'a [32, 33].

Ideą modeli strefowych jest podział każdej ze stref na podstrefy, dzięki czemu możliwe jest określenie rozkładu parametrów fizycznych powietrza wewnątrz danej strefy [32]. Modele strefowe stanowią formę przejściową pomiędzy modelami sieciowymi a modelami CFD wykorzystującymi numeryczną mechanikę płynów [2]. Modele strefowe wykorzystują równania algebraiczne i różniczkowe do opisu zjawisk przepływu powietrza i wymiany ciepła w każdej strefie w budynku. Wykorzystują one również równania zachowania energii i pędu do prognozowania pola prędkości i temperatury. Główną zaletą modeli strefowych jest możliwość modelowania międzystrefowych przepływów powietrza z uwzględnieniem gradientów temperatury, rozprzestrzeniania się wilgoci i zanieczyszczeń wewnątrz każdej ze stref. Ze względu na krótki czas obliczeń komputerowych metoda ta wydaje się być obiecująca dla zastosowań praktycznych.

Do najbardziej zaawansowanych technik badania przepływów powietrza w budynkach zaliczane są metody Numerycznej Mechanicznej Płynów (CFD). Programy wykorzystujące techniki CFD rozwiązują cząstkowe równania różniczkowe przepływu powietrza i energii metodą objętości skończonych lub elementów skończonych. Mikroskopowe podejście do opisywanych zjawisk przepływu wymaga dużo większej mocy obliczeniowej w stosunku do modeli strefowych, które wykorzystują makroskopowy opis procesu. Podstawy numerycznego modelowania przepływów powietrza omówiono w [34, 35, 36]. Początki zastosowania technik CFD w dziedzinie wentylacji sięgają lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jedną z pierwszych osób zajmujących się numerycznym modelowaniem przepływów powietrza był Nielsen [19, 37]. Techniki numerycznej mechaniki płynów w wentylacji wykorzystywane są najczęściej do [37]:

- prognozowania rozprzestrzeniania się strug powietrza,
- prognozowania przepływów powietrza w budynkach,
- oceny jakości powietrza wewnętrznego i komfortu cieplnego,

- prognozowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń emitowanych przez wewnętrzne źródła w budynku,
- prognozowania rozprzestrzeniania się pożaru i dymu w budynku, itp.

Zastosowanie technik CFD w dziedzinie wentylacji zostało omówione w [2, 19, 37, 38]. Oryginalną pracą o modelowaniu przepływów powietrza w pomieszczeniach jest praca Lipskiej [39]. Praca ta jest kompleksowym opracowaniem dotyczącym kontroli jakości numerycznego modelowania przepływów powietrza w budynkach. Techniki CFD znajdują coraz większe zastosowanie praktyczne głównie za sprawą dostępu do komputerów obliczeniowych o dużej mocy. Jednakże koszty komercyjnych programów CFD są nadal bardzo wysokie.

W badaniach intensywności wymiany powietrza w budynkach poza metodami obliczeniowymi wykorzystywane są bezpośrednio metody pomiarowe. Przegląd różnych metod pomiarowych stosowanych w wentylacji został omówiony w pracy [40]. Możemy rozróżnić cztery głównie grupy technik pomiarowych: pomiary prędkości powietrza, infiltracji powietrza przez nieszczelności w obudowie zewnętrznej, pomiary systemów wentylacyjnych i pomiary gazami znacznikowymi.

Pomiary prędkości powietrza wykonywane są najczęściej termooanemometrami. Metoda ta jest prosta i tania a do jej wad można zaliczyć trudności w pomiarze kierunku przepływu oraz pomiary przy bardzo małych prędkościach [21, 40]. Możliwości takie dają pomiary z wykorzystaniem laserowej anemometrii laserem Dopplera (LDA - Laser Doppler Anemometry). Jest to metoda bardzo dokładna, nieinwazyjna jednak wymaga dysponowania złożoną i kosztowną aparaturą pomiarową. Nową techniką pomiaru przepływów powietrza jest Cyfrowa Anemometria Obrazowa (PIV - Partickel Image Velocimetry). Daje ona możliwość pomiaru bardzo małych prędkości. Do tej pory wykorzystywana była głównie w pomiarach laboratoryjnych w małych obiektach [21]. Do technik wykorzystywanych w pomiarach infiltracji powietrza przez obudowę istniejących budynku należą głównie testy ciśnieniowe [11, 21]. Metody badania przepływów powietrza za pomocą testów ciśnieniowych w budynkach wielostrefowych omówiono w [11, 40]. Pomiary systemów wentylacyjnych obejmują przede wszystkim pomiary nieszczelności przewodów i przepływów powietrza w przewodach wentylacyjnych oraz pomiary przepływów przez urządzenia wentylacyjne [20].

Popularnymi metodami badania przepływów powietrza w budynkach są metody znaczników gazowych. Jako znaczniki gazowe najczęściej stosowane są gazy emitowane z butli między innymi: N_2O , SF_6 a także CO_2 [2, 9, 11]. Oprócz ditlenku węgla emitowanego z butli w pomiarach wentylacyjnych zastosowanie znajduje również ditlenek węgla generowany w procesie oddychania ludzi. Pomiary gazami znacznikowymi zostały omówione w [2, 11, 19, 21, 40, 41]. Sandberg poświęca im w swojej książce trzy rozdziały [11]. Teoria pomiarów znacznikami gazowymi bazuje na zero-wymiarowych modelach strefowych pomieszczeń. Zakłada ona idealne wymieszanie znacznika gazowego i jednorodne parametry powietrza w każdej strefie. Modele jednostrefowe służą jedynie do określania liczby wymian powietrza pomiędzy strefą i otoczeniem. Wewnętrzne przepływy powietrza można wyznaczyć wykorzystując modele wielostre-

fove. Zakładają one dwukierunkowe przepływy powietrza pomiędzy strefami i otoczeniem. Danymi wejściowymi do modeli strefowych są pomiary stężenia znaczników gazowych. Matematyczny opis procesu stanowią równania bilansu masy dla powietrza i znaczników gazowych. Określanie wymiany powietrza metodą jednego znacznika gazowego w pojedynczej strefie określa polska norma PN-EN ISO 12569 [42], będąca tłumaczeniem normy europejskiej, a także norma ASTM E741 [43]. Norma polska przedstawia trzy metody badania wymiany powietrza: metodę zaniku stężenia gazu znacznikowego, metodę stałej iniekcji i metodę stałego stężenia. W normie przedstawiono wymaganą aparaturę badawczą i metody wzorcowania analizatorów gazu, omówiono również procedurę próbkowania wraz z analizą wyników i błędów pomiarowych. W normie europejskiej ASTM E741 znajdziemy dodatkowo informacje o stosowanych gazach znacznikowych ich toksyczności, reaktywności chemicznej oraz możliwościach ich detekcji. Wyniki badań wymiany powietrza metodą jednego znacznika gazowego przedstawiono w publikacjach [41, 44, 45, 46, 47].

Szczególnie interesujące wyniki uzyskuje się wykorzystując metodę gazów znacznikowych do określania międzystrefowych przepływów powietrza. W Lawrence Berkeley Laboratory opracowano system do określania międzystrefowych przepływów powietrza metodą wielu gazów znacznikowych MTMS (Multi Tracer Measurement System) [48, 49, 50]. W raporcie [48] omówiono działanie systemu MTMS obejmujące wprowadzanie kontrolowanej ilości gazów znacznikowych do określonej strefy, pomiar stężenia znaczników w każdej strefie, akwizycja danych i wyników do dalszej analizy.

Innym obszernym opracowaniem dotyczącym zastosowania gazów znacznikowych w pomiarach wymiany powietrza jest praca Perery [41]. W pracy tej omówione zostały dwie metody określania międzystrefowych przepływów powietrza: metodą wielu gazów znacznikowych oraz metodą jednego gazu znacznikowego. Opis modeli wykorzystywanych do określania przepływów powietrza z wykorzystaniem gazów znacznikowych przedstawiono w [51, 52, 53, 54, 55].

Wśród gazów znacznikowych wykorzystywanych w badaniach wymiany powietrza istotną rolę odgrywa metabolicznie generowany ditlenek węgla. Do obliczeń wymiany powietrza na podstawie stężenia CO_2 najczęściej stosowane są metody wykorzystujące modele jednostrefowe [9, 10, 46, 47, 56, 57, 58, 59]. W literaturze można spotkać nieliczne próby wykorzystania ditlenku węgla do obliczania międzystrefowych przepływów powietrza z wykorzystaniem modeli wielostrefowych [16, 18, 60, 61]. Modele takie charakteryzują się większą liczbą niewiadomych strumieni powietrza od ilości równań bilansowych i wymagają zastosowania odpowiednich metod programowania nieliniowego [62, 63, 64, 53]. Brohus i Trier [54] poszukiwali minimum funkcji metodą najmniejszych kwadratów do obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza w trzech strefach przy użyciu dwóch gazów znacznikowych. Przykłady zastosowania generowanego metabolicznie ditlenku węgla do określenia międzystrefowych przepływów powietrza można znaleźć w artykułach Penman'a [16, 17] i Smith'a [18].

Ważnym elementem wpływającym na dokładność obliczeń przepływów powietrza jest niepewność pomiaru stężenia gazu znacznikowego. W każdej strefie pomiarowej zakłada się jed-

norodne stężenie gazu znacznikowego. Pozwala to na ograniczenie miejsc próbkowania gazu do jednego punktu w danej strefie. Jednakże w rzeczywistości mamy do czynienia z niejednorodnym polem stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Stanowi ono główne źródło błędów pomiaru w metodzie. Główną zaletą tej metody jest natomiast możliwość wykonywania pomiarów w normalnie eksploatowanych pomieszczeniach co znacząco obniża ich koszt. W praktyce nie ma możliwości pomiarowej identyfikacji pełnego rozkładu przestrzennego ditlenku węgla. Możliwe jest zainstalowanie skończonej liczby czujników pomiarowych. Dlatego z punktu widzenia dokładności obliczeń przepływów powietrza ważne jest określenie optymalnego umiejscowienia tych czujników. Naydenov i in. [65] badali rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu mieszkalnym. Uzyskali oni odchylenia od wartości średniej stężenia ditlenku węgla (z siedmiu czujników) dochodzące do 50 ppm w czasie nieobecności mieszkańców i do 270 ppm w nocy w czasie snu. Przykłady innych badań dotyczących wpływu miejsc próbkowania oraz liczby punktów pomiaru stężenia znacznika gazowego można znaleźć w publikacjach [46, 66, 67, 68]. Awbi w swojej książce [21] przedstawia zastosowanie metody planowania eksperymentów do określania liczby punktów pomiarowych i ich rozmieszczenia. Z prezentowanych w literaturze wyników badań wynika, że zarówno liczba czujników jak i ich rozmieszczenie mają istotny wpływ na dokładność wyników obliczeń strumieni powietrza i powinny być przedmiotem optymalizacji. Możliwości takie dają metody CFD.

Modelowanie CFD rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych wykorzystywane jest najczęściej do oceny jakości powietrza wewnętrznego, oceny ekspozycji i narażenia zdrowia ludzi na szkodliwe zanieczyszczanie a także do oceny skuteczności instalacji wentylacyjnych w budynkach [11, 19]. Wiele cennych uwag dotyczących modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w pomieszczeniach w tym ich oddziaływanie na ludzi zawierają raporty opracowane w Health and Safety Laboratory w Wielkiej Brytanii [69, 70]. W pracy Hanga i in. [71] przedstawiono wyniki modelowania rozprzestrzeniania się ditlenku węgla wydychanego przez ludzi i tlenku węgla powstałego w czasie spalania gazu w kuchence gazowej. Modelowaniem rozprzestrzeniania się tych dwóch zanieczyszczeń zostało objęte całe mieszkanie. Chang H. Son w [72] przedstawia wyniki modelowania rozprzestrzeniania się CO₂ wydychanego przez astronautów stacji kosmicznej. W innym przypadku modelowanie rozprzestrzeniania ditlenku węgla wykorzystane zostało do badania wpływu wewnętrznych przegród budowlanych na liczbę wymian powietrza w budynku [19]. Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w pomieszczeniu z ludźmi wymaga zamodelowania procesu oddychania, źródła ciepła od człowieka, a także ruchu człowieka jeśli jest ono istotne dla analizowanego przypadku. W dostępnej literaturze nie znaleziono wyników modelowania numerycznego rozprzestrzeniania się wydychanego przez ludzi ditlenku węgla dla potrzeb optymalizacji rozmieszczenia czujników CO₂ w czasie pomiarów.

1.3 Cel i zakres pracy

Podstawowym celem pracy było opracowanie metody i algorytmu określania międzystrefowych przepływów powietrza w oparciu o pomiary generowanego metabolicznie ditlenku węgla. Znajomość międzystrefowych przepływów powietrza pozwala na ocenę intensywności wentylacji w pomieszczeniach i jakości powietrza wewnętrznego. Cel pracy zrealizowano w następujących etapach badań obejmujących:

- budowę modelu matematycznego i programu komputerowego do wyznaczenia międzystrefowych przepływów powietrza w budynku mieszkalnym,
- weryfikację opracowanego modelu matematycznego i ocenę dokładności rozwiązania,
- pomiary stężenia ditlenku węgla w wybranych budynkach mieszkalnych,
- obliczenia intensywności wentylacji w wybranych budynkach z wykorzystaniem wyników pomiarów,
- opracowanie modelu numerycznego CFD dla symulacji rozprzestrzeniania się wydychanego przez ludzi ditlenku węgla w pomieszczeniu,
- poszukiwanie reprezentatywnych miejsc pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu dla określania intensywności wentylacji.

Metoda obliczeniowa międzystrefowych przepływów powietrza w budynku bazuje na zero-wymiarowych modelach strefowych, wykorzystujących bilanse strumieni ditlenku węgla i powietrza w strefach pomiarowych. Poszukiwanie wartości strumieni powietrza na podstawie pomiarów czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla w strefach pomiarowych wymaga rozwiązania zagadnienia odwrotnego. W tym celu postanowiono opracować program komputerowy wykorzystujący algorytm Levenberga-Marquardta. W niniejszej pracy obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza wykonano dla danych pomiarowych zarejestrowanych w dwóch mieszkaniach. Pomiary przeprowadzono w okresie zimowym i wczesnej wiosny w latach 2005-2010. Przeprowadzono empiryczną weryfikację dokładności obliczeń liczby wymian powietrza dla pojedynczego pokoju. Dla większej liczby stref przeprowadzono ocenę dokładności rozwiązania zadania odwrotnego.

Zero-wymiarowe modele strefowe pomieszczeń wykorzystują informację o średnim stężeniu ditlenku węgla w danej strefie pomiarowej w każdej chwili czasowej, zakładając przy tym idealne wymieszanie powietrza w pomieszczeniu. Jak pokazują dostępne w literaturze wyniki badań, pomiędzy różnymi punktami w pomieszczeniu mogą występować znaczące różnice w stężeniu ditlenku węgla [19, 46]. W związku z tym istotne jest miejsce lokalizacji czujników pomiarowych w czasie badań tak, aby zmierzone wartości były reprezentatywne dla całego pomieszczenia. W pracy zamodelowano pomieszczenie z wentylacją naturalną i oddychającym człowiekiem stanowiącym jedyne źródło emisji ditlenku węgla. W obliczeniach numerycznych uwzględniono czynniki mogące wpływać na migrację ditlenku węgla w pomieszczeniu

takie jak: geometria szczeliny nawiewnej, źródło ciepła od człowieka i grzejnika, zimna powierzchnia okna. Porównano zastosowanie dwóch modeli oddychania człowieka. Pierwszy z zastosowanych modeli został uproszczony do ciągłego wydychania powietrza, drugi obejmował cykliczne oddychanie. Przeprowadzono empiryczną walidację wyników obliczeń. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych wykorzystano do opracowania wytycznych dla usytuowania czujników do pomiaru stężenia ditlenku w pomieszczeniach.

Niniejsza praca podzielona została na sześć rozdziałów. **Rozdział 1** zawiera wstęp, przegląd literatury i omówienie celów pracy. W **Rozdziale 2** omówiono metodykę badania wymiany powietrza metodą gazów znacznikowych. Szczególną uwagę poświęcono pomiarom z wykorzystaniem generowanego metabolicznie ditlenku węgla. **Rozdział 3** pracy zawiera wyniki pomiarów stężenia ditlenku węgla i innych parametrów powietrza w dwóch mieszkaniach, które wykorzystano do walidacji modelu numerycznego rozprzestrzeniania się wydychanego CO₂ w pomieszczeniu oraz do obliczeń intensywności wentylacji pomieszczeń. W **Rozdziale 4** omówiono model matematyczny i program komputerowy do określania międzystrefowych przepływów powietrza w budynku oraz wyniki przeprowadzonych obliczeń wraz z analizą dokładności rozwiązania. **Rozdział 5** zawiera opis modelu numerycznego CFD dla obliczeń rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu. W rozdziale tym przedstawiono budowę modelu i wyniki obliczeń symulacyjnych dla różnych wariantów. Wyniki symulacji numerycznej pozwoliły na określenie reprezentatywnych obszarów pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu ze śpiącym człowiekiem. W **Rozdziale 6** przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe oraz wytyczne dla prowadzenia dalszych badań.

Rozdział 2

Metodyka badania wymiany powietrza w budynkach z wentylacją naturalną

2.1 Wentylacja naturalna w budynkach mieszkalnych

Wentylacja naturalna jest najczęściej stosowanym rodzajem wentylacji w budynkach mieszkalnych w Polsce. Zaletą wentylacji naturalnej jest prosta budowa, niewielki koszt oraz niskie zużycie energii. Badania wykazują również większą satysfakcję użytkowników wentylacji naturalnej w porównaniu z wentylacją mechaniczną [2, 21]. Do wad wentylacji naturalnej można zaliczyć skuteczność jej działania oraz zależność od charakteru naturalnych sił wymuszających przepływ powietrza. Może to skutkować problemami z przeciągami lub złą jakością powietrza wewnętrznego w okresie zimowym a także trudnością w utrzymaniu parametrów komfortu termicznego w okresie upałów. W Polsce głównym problemem jest zła jakość powietrza w pomieszczeniach w okresie zimowym. Problem ten szczególnie nasilił się wraz z termomodernizacją budynków, która spowodowała znaczące ograniczenie naturalnych dróg napływu świeżego powietrza do budynku.

2.1.1 Mechanizmy wentylacji naturalnej

Wentylacja naturalna pomieszczeń wywołana jest różnicą ciśnienia na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni budynku w wyniku działania sił naporu wiatru i wyporu termicznego. Zadaniem wentylacji jest wymiana powietrza wewnątrz pomieszczeń w celu osiągnięcia odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego. Wymiana powietrza powoduje usunięcie zanieczyszczeń (gazowych, parowych i pyłowych) z pomieszczenia lub ich rozcieńczenie do stanu dopuszczalnego ze względów higienicznych.

Skuteczność działania wentylacji naturalnej zależy od warunków zewnętrznych obejmujących mikroklimat (prędkość wiatru, temperaturę, wilgotność, topografię terenu) i parametrów charakteryzujących budynek (orientacja w terenie, ilość okien i innych otworów, ich wielkość oraz usytuowanie) [21].

Ze względu na sposób wykorzystania sił wymuszających wentylację naturalną można podzielić na trzy kategorie [2, 73]:

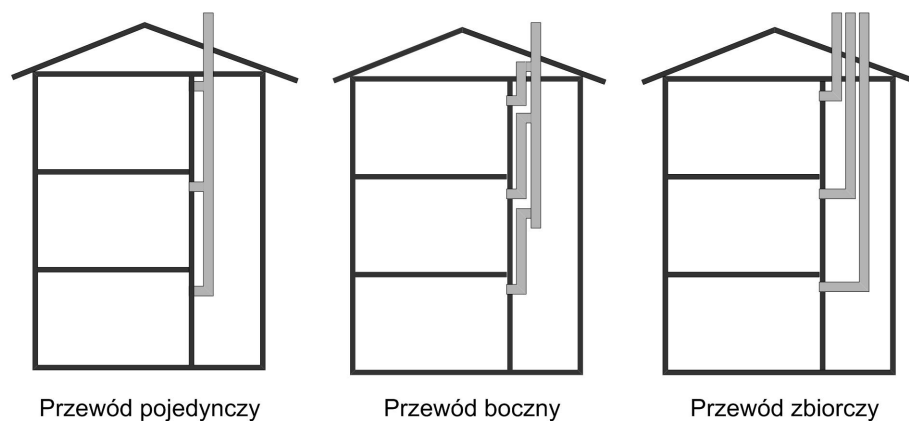
- Wentylacja jednostronna (Single side ventilation) występuje, gdy otwory wentylacyjne są po jednej stronie budynku. Główną siłą wymuszającą przepływ powietrza jest wypór termiczny w zimie i napór wiatru w lecie. Strumień powietrza wentylacyjnego nie jest wówczas duży i ma niewielki zasięg w pomieszczeniu. Gdy temperatura powietrza w pomieszczeniu jest wyższa od temperatury zewnętrznej siły wyporu powodują, że zimne powietrze napływa przez dolną część okna a wypływa na zewnątrz przez górną część okna.
- Wentylacja poprzeczna (Cross ventilation) występuje gdy otwory wentylacyjne są na dwóch lub więcej stronach budynku. Główną siłą wymuszającą jest różnica ciśnień pomiędzy otworami wywołana przez wiatr. Powietrze napływa jedną stroną do budynku następnie przepływa przez wewnętrzne pomieszczenia i opuszcza budynek po drugiej stronie. Wentylacja poprzeczna charakteryzuje się dużym zasięgiem strumienia powietrza wentylacyjnego ale także trudnościami w kontrolowaniu procesu.
- Wentylacja wyporowa - grawitacyjna (Stack ventilation) występuje gdy otwory usytuowane są na różnej wysokości budynku. Główną siłą wymuszającą przepływ powietrza jest wypór termiczny. Ciepłe powietrze unosi się do góry i jest usuwane przez górne otwory w budynku. Usuwane powietrze jest zastępowane przez świeże napływające przez dolne otwory. Cyrkulacja powietrza wewnątrz całego budynku zależy od jego wewnętrznych podziałów. W pojedynczym pomieszczeniu z zamkniętymi drzwiami mamy do czynienia z wentylacją jednostronną. Po otwarciu drzwi występuje wentylacja grawitacyjna w zimie i wentylacja poprzeczna w okresie letnim.

Skuteczność wentylacji naturalnej w dużej mierze zależy od sposobu zaprojektowania budynku. Istotnymi elementami architektonicznymi kształtującymi proces wentylacji naturalnej są: otwory i okna w elewacji budynku, kominy, przedsionki, wieże ciśnień itp. Na wymianę powietrza w budynkach wpływa również szczelność elementów konstrukcyjnych budynków. Szczelne okna, drzwi i przegrody wpływają korzystnie na zużycie energii w budynkach, niestety ograniczają drogi infiltracji powietrza do budynku. Czynnikiem wpływającym na projektowanie wentylacji naturalnej są również wysokość i geometria budynku [73].

W budynkach mieszkalnych w Polsce stosuje się przede wszystkim kanałową wentylację naturalną (grawitacyjną). Charakteryzuje ją układ przewodów wentylacyjnych indywidualnych lub zbiorczych instalowanych w budynku (rysunek 2.1). Wymiana powietrza jest w tym przypadku wynikiem podciśnieniowego działania przewodów wywiewnych w warunkach dużej różnicy temperatury w pomieszczeniu i otoczeniu. Ilość powietrza wentylacyjnego płynącego przewodami wywiewnymi zależy nie tylko od podciśnienia w przewodach wywiewnych, ale również od zapewnienia dopływu świeżego powietrza. Dlatego o skuteczności wymiany powietrza

z kanałową wentylacją naturalną decyduje ilość powietrza napływającego z zewnątrz. W tym celu wykorzystuje się głównie infiltrację powietrza przez nieszczelności w stolarnie okiennej i drzwiowej a także w niewielkim stopniu infiltrację przez przegrody budowlane. Zorganizowane otwory nawiewne w górnej lub dolnej części okna, podwójnie przeszklone elewacje zewnętrzne (double skin façade) są jednak w polskim budownictwie rzadkością. Rozwiązania te są powszechnie stosowane w budynkach z wentylacją naturalną w wielu krajach [2, 73].

W okresie letnim przy małych różnicach temperatur wewnątrz i na zewnątrz budynku wykorzystuje się przewietrzanie pomieszczeń przez otwieranie okien i drzwi (np. przez uchylne skrzydła okienne). W okresie zimowym siły wyporu termicznego są na tyle duże że naturalne otwory i nieszczelności w budynku powinny być wystarczające dla zapewnienia wentylacji pomieszczeń. Jednakże w dobrze zaizolowanych budynkach naturalne drogi infiltracji powietrza zostały praktycznie ograniczone do zera. W budynkach tych wykorzystuje się jedynie napływ powietrza przez tzw. „mikroszczeliny w oknie”, które nie są wystarczające dla zapewnienia odpowiedniej wentylacji w pomieszczeniu. Jak pokazują badania [4, 7, 57] ilość powietrza doprowadzana do pomieszczeń rzadko spełnia minimalne wymagania wentylacyjne określone w polskiej normie PN-83/B-03430 [74].



Rysunek 2.1: Układ przewodów wentylacyjnych w budynkach mieszkalnych

2.1.2 Uregulowania normatywne wymaganej intensywności wentylacji

Strumienie powietrza wentylacyjnego jakie należy doprowadzić do pomieszczeń w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego lub użyteczności publicznej określa norma PN-83/B-03430 [74]. Norma zaleca przyjmowanie następujących strumieni powietrza:

- co najmniej $20 \text{ m}^3/\text{h}$ dla każdej osoby w pomieszczeniach z zakazem palenia w których istnieje możliwość otwierania okien,
- $30 \text{ m}^3/\text{h}$ w pomieszczeniach publicznych w których dozwolone jest palenie tytoniu,

- w przedszkolach i żłobkach strumień powietrza może być obniżony do $15 \text{ m}^3/\text{h}$ na każde dziecko.

Strumień powietrza wentylacyjnego dla mieszkania określa się jako sumę strumieni powietrza usuwanych z poszczególnych pomieszczeń. Dopływ powietrza zewnętrznego powinien być zapewniony przez otwory o regulowanym stopniu otwarcia lub przez okna ze skrzydłem uchylno-rozwieralnym. Odpływ powietrza z tych pomieszczeń powinien odbywać się przez otwory wywiewne przyłączone do pionowych przewodów wentylacyjnych. W pokojach powietrze może być usuwane przez otwory wyrównawcze. W budynkach do 9 kondygnacji może być stosowana wentylacja grawitacyjna lub mechaniczna natomiast w budynkach wyższych tylko wentylacja mechaniczna wywiewna lub nawiewno-wywiewna [75]. Minimalną liczbę wymian powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych z wentylacją naturalną określa również norma PN-EN 15251:2007 [76].

Przy projektowaniu wentylacji mechanicznej dla budynków niemieszkalnych (np. biura, szkoły, restauracje) wymaganą ilość powietrza wentylacyjnego określa norma PN-EN 13779 [77]. Strumień powietrza wentylacyjnego określa się w niej w zależności od przyjętego kryterium jakości powietrza wewnętrznego, którym może być:

- przyrost stężenia ditlenku węgla,
- odczuwalna jakość powietrza,
- strumień powietrza przypadającego na jedną osobę (tablica 2.1),
- stężenie innych zanieczyszczeń,

Tablica 2.1: Wartości strumienia objętości powietrza zewnętrznego przypadającego na osobę, wg PN EN 13779

Kategoria jakości powietrza w pomieszczeniu	Strumień powietrza przypadający na jedną osobę, $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{osobę})$	
	zakaz palenia tytoniu	dozwolone palenie tytoniu
Wysoka jakość powietrza	72,0	144,0
Średnia jakość powietrza	45,0	90,0
Umiarkowana jakość powietrza	28,8	57,6
Niska jakość powietrza	18,0	36,0

W normach najczęściej podawane są wartości strumieni powietrza zewnętrznego jakie należy doprowadzić do pomieszczenia w którym głównym źródłem zanieczyszczeń jest człowiek. Pomieszczenia w których dominują inne zanieczyszczenia powietrza lub pomieszczenia o znaczących obciążeniach cieplnych lub chłodniczych wymagają innych metod określania strumieni powietrza wentylacyjnego takich jak: bilanse ciepłno-wilgotnościowe, bilanse zanieczyszczeń pyłowych i gazowych wydzielających się w pomieszczeniu [1, 78, 79].

2.2 Badania wymiany powietrza w budynkach metodą gazów znacznikowych

Niezbędnym elementem w czasie eksploatacji budynków z wentylacją naturalną są pomiary pozwalające na ocenę rzeczywistej intensywności wentylacji. Do oceny intensywności wentylacji najczęściej wykorzystuje się gazy znacznikowe.

Metody gazów znacznikowych polegają na wprowadzaniu do badanej przestrzeni określonej ilości gazu jako znacznika oraz obserwacji zmian jego stężenia w powietrzu wewnętrznym. Dysponując danymi na temat emisji oraz rozkładu stężenia znacznika gazowego w pomieszczeniu można określać drogi przepływu powietrza oraz intensywność wymiany powietrza.

Metody gazów znacznikowych wykorzystywane są w określaniu:

- liczby wymian powietrza w pomieszczeniach,
- rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń,
- identyfikacji „krótkich spięć” w instalacjach wentylacyjnych,
- skuteczności odciągów miejscowych,
- międzystrefowych przepływów powietrza, itd.

Jedną z pierwszych osób, która wykorzystwała gazy znacznikowe w badaniach wentylacyjnych był Max von Pettenkofer. W latach pięćdziesiątych XIX wieku badał on wentylację w budynku szpitalnym w Munich. Jako gazu znacznikowego używał ditlenku węgla wydychanego przez ludzi oraz pochodzącego z procesu spalania węgla. W latach trzydziestych XX wieku Dufton i Marley jako gazu znacznikowego używali pary wodnej [11]. Marley prowadził również badania w pomieszczeniach mieszkalnych z wykorzystaniem wydychanego przez ludzi ditlenku węgla [80]. Zaś Dick badał wentylację naturalną za pomocą wodoru. Obecnie metody gazów znacznikowych uznawane są za najbardziej wygodne i dokładne dla określania wymiany powietrza. Przyczynił się do tego rozwój technik pomiarowych, które umożliwiły opracowanie przyrządów do pomiarów stężeń gazów z dużą dokładnością [11].

2.2.1 Metoda obliczeń

Metoda gazów znacznikowych bazuje na bilansie masowym powietrza i gazu znacznikowego w strefie pomiarowej. Bilans masowy powietrza opisuje równanie:

$$\frac{d}{dt}(\rho V) + \dot{m}_{out} = \dot{m}_{su} \quad (2.1)$$

gdzie: V jest objętością strefy, ρ jest gęstością powietrza w strefie, \dot{m}_{su} jest strumieniem masowym powietrza napływającego do strefy a \dot{m}_{out} jest strumieniem masowym powietrza wypływającego ze strefy pomiarowej.

W stanie ustalonym strumień masowy powietrza napływającego do strefy jest równy strumieniowi powietrza wypływającego:

$$\dot{m}_{su} = \dot{m}_{out} = \dot{m} \quad (2.2)$$

W podobny sposób jak równanie 2.1 zapisuje się bilans masowy gazu znacznikowego przy czym w równaniu tym pojawia się dodatkowo człon źródłowy ujmujący wprowadzaną ilość gazu znacznikowego do pomieszczenia \dot{m}_{gz} :

$$\frac{d}{dt} (\rho_{in} V C_{in}) + \dot{m} (C_{in} - C_{su}) = \dot{m}_{gz} \quad (2.3)$$

gdzie: C_{in} oznacza stężenie gazu znacznikowego w pomieszczeniu, C_{su} oznacza stężenie gazu znacznikowego w powietrzu nawiewanym a \dot{m}_{gz} jest strumieniem masowy emitowanego gazu znacznikowego.

Zakładając stałą wartość temperatury i ciśnienia wewnątrz strefy pomiarowej i w otoczeniu oraz wprowadzając oznaczenie $C = (C_{in} - C_{su})$, bilans masowy gazu znacznikowego 2.3 dla danej strefy można zapisać dla strumieni objętościowych:

$$V \frac{dC}{dt} + \dot{V} C = \dot{V}_{gz} \quad (2.4)$$

gdzie: \dot{V} jest strumieniem objętościowym powietrza wentylacyjnego, a \dot{V}_{gz} jest strumieniem objętościowym emitowanego gazu znacznikowego.

W badaniach wentylacyjnych wykorzystuje się następujące metody znacznikowe:

- metoda zaniku gazu znacznikowego,
- metoda stałej emisji (iniekcji) gazu znacznikowego,
- metoda stałego stężenia.

Metoda zaniku stężenia gazu znacznikowego

Metoda zaniku stężenia gazu znacznikowego polega na jednorazowym wprowadzeniu określonej ilości znacznika do pomieszczenia i dokładnym wymieszaniu go z powietrzem. Po zaprzestaniu dozowania gazu następuje rejestracja zmian jego stężenia. W celu zapewnienia dokładnego wymieszania gazu znacznikowego w całej przestrzeni pomieszczenia wykorzystywane są wentylatory mieszające powietrze przez cały czas trwania pomiaru. Równanie 2.4 opisujące zmianę stężenia gazu znacznikowego w pomieszczeniu przyjmuje postać:

$$V \frac{dC}{dt} + \dot{V} C = 0 \quad (2.5)$$

Jeżeli strumień powietrza przepływający przez pomieszczenie jest stały, wówczas stężenie znacznika maleje wykładniczo w czasie.

Po scałkowaniu i przekształceniu równania 2.5 otrzymujemy zależność na liczbę wymian powietrza n w przedziale czasu t_0 do t :

$$n = \frac{\ln[C(t_0) - C(t)]}{t - t_0} \quad (2.6)$$

Metoda stałej emisji gazu znacznikowego

Metoda stałej emisji gazu znacznikowego, polega na dostarczaniu stałego strumienia objętości gazu znacznikowego do przestrzeni pomiarowej i rejestracji zmian w czasie stężenia tego gazu w pomieszczeniu, aż do osiągnięcia stanu ustalonego. Metoda stałej emisji jest wykorzystywana w ciągłych długotrwałych pomiarach wymiany powietrza w pomieszczeniach lub w pomiarach przepływu powietrza w przewodach wentylacyjnych. Wadą tej metody jest duże zużycie gazu znacznikowego. W metodzie stałej emisji gazu znacznikowego średnią liczbę wymian powietrza n w pomieszczeniu dla okresu czasu (t_0, t) określa się na podstawie równania:

$$n = \frac{V_{gz}}{[C(t) - C(t_0)]V} \quad (2.7)$$

gdzie: V jest objętością strefy, $C(t)$ jest stężeniem gazu znacznikowego w chwili czasu t , \dot{V}_{gz} jest strumieniem objętościowym emitowanego gazu znacznikowego

Metoda stałego stężenia gazu znacznikowego

Metoda stałego stężenia gazu znacznikowego polega na dostarczaniu znacznika do pomieszczenia przez cały czas trwania pomiarów, przy czym strumień objętości dostarczanego gazu znacznikowego zmieniany jest w zależności od aktualnej liczby wymian powietrza, tak aby utrzymać stałe jego stężenie w powietrzu. Metoda stałego stężenia wymaga ciągłej komputerowej kontroli zależności pomiędzy ilością dozowanego gazu a rejestrowanym stężeniem. Jeśli układ sterujący strumieniem dostarczanego gazu znacznikowego działa właściwie, to mierzone stężenie w pomieszczeniu jest prawie stałe $dC/dt = 0$. W metodzie stałego stężenia gazu znacznikowego liczbę wymian powietrza określa się na podstawie równania:

$$n = \frac{V_{gz}}{[C_c - C(t_0)]V} \quad (2.8)$$

gdzie: C_c jest wartością utrzymywanego stężenia gazu znacznikowego w strefie pomiarowej.

Podstawowym warunkiem uzyskania rzeczywistej wartości wymiany powietrza w badanej przestrzeni jest zapewnienie dobrego wymieszania gazu znacznikowego z powietrzem w pomieszczeniu jest. Najczęściej w tym celu wykorzystuje się wentylatory mieszające. Polska norma PN-EN ISO 12569 [42] zaleca aby po wymieszaniu gazu znacznikowego jego stężenie wahało się mniej niż 10% od wartości średniej o obrębie strefy. Jednorodność stężenia należy potwierdzić na podstawie równoległych próbek powietrza pobranych co najmniej z dwóch różnych miejsc w strefie.

2.2.2 Wytyczne prowadzenia badań

Wybór jednej z powyższych metod pomiarowych związany jest również z wyborem odpowiedniego rodzaju gazu znacznikowego, doбором odpowiedniej aparatury pomiarowej i metody interpretacji wyników pomiarów. Idealny gaz znacznikowy powinien spełniać następujące wymagania [11, 41, 58]:

- nie powinien być łatwopalny, wybuchowy, oraz alergiczny,
- nie powinien posiadać właściwości toksycznych przy stężeniach spotykanych w czasie pomiarów,
- gęstość gazu znacznikowego powinna być zbliżona do gęstości powietrza lub powinien on być wcześniej rozcieńczony w powietrzu w celu zwiększenia jego zdolności dyfuzyjnych,
- nie powinien podlegać zjawisku absorpcji przez elementy wyposażenia pomieszczenia,
- nie powinien się rozkładać ani reagować z powietrzem lub elementami konstrukcji i wyposażenia budynku,
- powinien być łatwo wykrywalny w możliwie niskich stężeniach,
- jego stężenie w powietrzu zewnętrznym powinno być możliwie niskie,
- koszty zakupu gazu znacznikowego na potrzeby pomiarów powinny być możliwie niskie.

Żaden ze stosowanych w praktyce gazów znacznikowych nie spełnia wszystkich wymagań gazu idealnego. Do najczęściej stosowanych gazów znacznikowych należą: sześćciofluorek siarki, podtlenek azotu, ditlenek węgla oraz hel [42]. Dokładność pomiarów wentylacyjnych prowadzonych metodą gazów znacznikowych zależy od rodzaju i ilości stosowanego gazu znacznikowego a także od dokładności pomiaru zmian jego stężenia, co związane jest z rodzajem zastosowanego analizatora. Wśród analizatorów najczęściej wykorzystywane są: spektrometry absorpcji w podczerwieni, analizatory fotoakustyczne i chromatografy gazowe [11].

Ważnym elementem prowadzonych badań jest sposób wprowadzania gazu znacznikowego do pomieszczenia oraz sposób jego próbkowania. Sposoby te można podzielić na aktywne i pasywne. Metody aktywne polegają na wprowadzaniu gazu znacznikowego do pomieszczenia pod ciśnieniem i pobieraniu próbek powietrza za pomocą pompki, które przez sieć rurek dostarczają próbkę do analizatora. W metodach pasywnych do transportu próbek gazu wykorzystywana jest dyfuzja molekularna. Szczegółowe procedury wprowadzania i próbkowania gazu znacznikowego w czasie pomiarów omówiono w normie ASTM E 74-00 [43] i w polskiej normie PN-EN ISO 12569 [42].

2.3 Wykorzystanie metabolicznego ditlenku węgla jako gazu znacznikowego

2.3.1 Oddziaływanie ditlenku węgla na organizm człowieka

Ditlenek węgla jest naturalnym składnikiem powietrza atmosferycznego. Jest gazem bezbarwnym, bez zapachu, niepalnym, cięższym od powietrza (stosunek gęstości ditlenku węgla do powietrza wynosi 1,524) [81]. Emisja dwutlenku węgla do atmosfery jest przede wszystkim konsekwencją tlenowego spalania związków chemicznych zawierających atomy węgla. Do atmosfery dostaje się również w wyniku procesów oddychania ludzi i zwierząt oraz w wyniku procesów fermentacji i butwienia. Ditlenek węgla usuwany jest z atmosfery dzięki asymilacji przez rośliny i powstawaniu naturalnych węglanów [82]. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu atmosferycznym nie jest stałe i może się wahać pomiędzy 300 - 500 ppm w zależności od pory dnia, roku, warunków pogodowych, czy lokalizacji budynku [9].

We wszystkich pomieszczeniach zamkniętych, gdzie przebywa człowiek, następuje w wyniku procesu oddychania ubytek tlenu i wzrost stężenia ditlenku węgla. Stężenie CO₂ w powietrzu wydychanym z płuc waha się między 40000-50000 ppm [6]. Ilość produkowanego przez człowieka ditlenku węgla może różnić się w zależności od masy ciała i poziomu jego aktywności metabolicznej [9]. W tabeli przedstawiono ilość CO₂ wydychanego przez dorosłego człowieka przy wykonywaniu różnych czynności. Dla dzieci można przyjmować 70-80% wartości przyjmowanych dla osoby dorosłej [6].

Tablica 2.2: Strumień wydychanego CO₂ przez dorosłego człowieka [6, 15]

Rodzaj pracy	Aktywność metaboliczna, met	Strumień wydychanego CO ₂ , dm ³ /h
W pozycji leżącej, w czasie odpoczynku	0,8	10-12
W pozycji siedzącej	1,0	12-15
Lekka praca biurowa	1,2	19-24
Praca średnio ciężka	1,6	33-72
Ciężka praca	2,0	72-115
Bardzo ciężka praca	3,0	93-115

Strumień wydychanego CO₂ jest związany z ilością zużywanego tlenu. Ilość tlenu zużywanego przez jedną osobę w m³/h można wyznaczyć z zależności [9, 12]:

$$\dot{V}_{O_2} = 3,6 \frac{0,00276 \cdot A_D \cdot M}{0,23R_q + 0,7} \quad (2.9)$$

gdzie: A_D jest powierzchnią DuBois (powierzchnia ciała ludzkiego) w m², M jest aktywnością metaboliczną podawaną w jednostce met (1 met = 58 W), R_q jest współczynnikiem respiracyj-

nym. Powierzchnię DuBois możemy obliczyć z zależności [23]:

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot H^{0,725} \quad (2.10)$$

gdzie: H jest wzrostem osoby, m, W jest masą ciała, kg.

Współczynnik respiracyjny R_q zależy od stopnia aktywności i sprawności fizycznej człowieka jak również od diety. Przyjmuje wartość od 0,83 dla osoby dorosłej wykonującej lekką pracę lub znajdującą się w spoczynku do 1 dla bardzo ciężkiej pracy [9, 10]. W oparciu o znajomość współczynnika respiracyjnego R_q określa się strumień objętości wydychanego ditlenku węgla w m^3/h :

$$\dot{V}_{CO_2} = R_q \cdot \dot{V}_{O_2} \quad (2.11)$$

Stężenie ditlenku węgla w otoczeniu człowieka ma istotne znaczenie dla funkcjonowania organizmu ponieważ wpływa między innymi na szybkość pracy serca oraz odczyn krwi. Indywidualna wrażliwość człowieka na działanie CO_2 może być bardzo zróżnicowana.

Przyjmuje się, że oddychanie powietrzem o zawartości ditlenku węgla do 5000 ppm nie ma negatywnego wpływu na zdrowie człowieka, natomiast przy wzroście stężenia CO_2 powyżej 1000 ppm występuje złe samopoczucie, bóle głowy, uczucie duszności, osłabienia i niepokoju [1, 15, 58]. Stężenia powyżej 5000 ppm powodują pobudzenie ośrodka oddechowego i zwiększenie częstości oddechów, dochodzi wówczas do bólów i zawrotów głowy, szumu w uszach, zaburzeń postrzegania, nadmiernej potliwości i przekrwienia spojówek. Stężenie w granicach 100000 ppm jest już groźne dla życia, towarzyszą mu takie objawy jak: omamy, zaburzenia świadomości i drgawki oraz utrata przytomności w ciągu 1 minuty [82].

W Polsce istnieją przepisy określające dopuszczalne poziomy stężenia ditlenku węgla na stanowisku pracy jak również w pomieszczeniach niemieszkalnych przeznaczonych na pobyt ludzi. Zgodnie z Rozporządzeniem [83], najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) ditlenku węgla w powietrzu na stanowisku pracy wynosi 5000 ppm (9000 mg/m^3), natomiast najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe NDSC_h wynosi 15000 ppm (27000 mg/m^3). Dopuszczalne stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach niemieszkalnych (w pomieszczeniach biurowych, szkołach, przedszkolach) reguluje norma PN EN 13779 [77]. Wprowadza ona cztery dopuszczalne poziomy stężenia ditlenku węgla w zależności od wybranego poziomu jakości powietrza w pomieszczeniu. W tabelicy 2.3 przedstawiono wartości dopuszczalne stężenia ditlenku węgla w zależności od kategorii jakości powietrza. Wartości te wykorzystywane są między innymi przy sterowaniu systemami wentylacyjnymi DCV (Demand Control Ventilation) [84].

W Polskich przepisach nie ma normy określającej dopuszczalne stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi (mieszkania) dlatego wykorzystuje się standardy światowe. Norma ASHRAE [10] oraz Światowa Organizacja Zdrowia WHO zalecają przyjmować jako górny poziom stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach przeznaczonych dla stałego przebywania ludzi 1000 ppm. Utrzymanie stężenie ditlenku węgla na poziomie 1000 ppm wymaga doprowadzenia do pomieszczenia strumienia świeżego powietrza w ilości około $27 \text{ m}^3/h$ na osobę (zakładając stężenie CO_2 w otoczeniu 350 ppm). Norma

Europejska CEN [56] wprowadza natomiast trzy dopuszczalne poziomy stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach w których jedynym źródłem zanieczyszczeń jest człowiek. Zależą one od kategorii budynku. Dla budynku o wysokich wymaganiach jakości powietrza przyjmuje się stężenie CO₂ 460 ppm ponad stężenie w otoczeniu, dla budynku o średnich wymaganiach 660 ppm i 1190 dla budynku o niskich wymaganiach.

Dopuszczalne stężenie ditlenku węgla wykorzystywane jest jako parametr określający jakość powietrza wewnętrznego w którym występują jedynie zanieczyszczeniami pochodzące od człowieka. Służy również do obliczeń strumienia powietrza wentylacyjnego.

Tablica 2.3: Klasyfikacja jakości powietrza wewnętrznego na podstawie poziomu stężenia ditlenku węgla według PN EN 13779 [77]

Kategoria jakości powietrza w pomieszczeniu	Przyrost stężenia CO ₂ ponad poziom CO ₂ w powietrzu zewnętrznym, ppm
Wysoka jakość powietrza wewnętrznego	350
Średnia jakość powietrza wewnętrznego	500
Umiarkowana jakość powietrza wewnętrznego	800
Niska jakość powietrza wewnętrznego	1200

2.3.2 Ditlenek węgla jako gaz znacznikowy

Ditlenek węgla spełnia większość wymagań, jakie stawia się gazom znacznikowym. Do jego zalet należą łatwość wykonywania pomiarów w budynkach normalnie użytkowanych przez mieszkańców oraz niskie koszty w porównaniu do stosowanych innych gazów znacznikowych. Wadą ditlenku węgla jako znacznika gazowego jest jego obecność w powietrzu atmosferycznym, co powoduje, że w czasie pomiarów musi być kontrolowane jego stężenie w otoczeniu. Ponadto CO₂ emitowany jest nie tylko przez człowieka ale również przez inne wewnętrzne źródła (kuchenki, piecyki gazowe) oraz asymilowany jest przez rośliny. Również sposób określania emisji CO₂ od ludzi jest obarczony większym błędem niż pomiar ilości emitowanego gazu z butli.

Z przedstawionych w punkcie 2.2.1 metod gazów znacznikowych w pomiarach stężenia generowanego metabolicznego ditlenku węgla wykorzystuje się następujące metody:

- Metoda stałej emisji gazu znacznikowego. W metodzie tej rejestruje się narastanie stężenia CO₂ w czasie obecności ludzi w pomieszczeniu. Szczególnym przypadkiem tej metody jest metoda równowagi (osiągnięcia stanu ustalonego) stężenia CO₂ w pomieszczeniu, która została omówiona w normie ASTM D 6245-98 [9].
- Metoda zaniku stężenia gazu znacznikowego. W metodzie tej rejestruje się zanikanie stężenia CO₂ po wyjściu ludzi z badanej przestrzeni. Metoda ta została omówiona w normie ASTM D 6245-98.

W metodzie stałej emisji wydychany przez ludzi w pomieszczeniu ditlenek węgla narasta w czasie dążąc do stanu ustalonego. Stężenie CO_2 w stanie ustalonym zależy od ilości świeżego powietrza oraz wielkości pomieszczenia a także od ilości wydychanego ditlenku węgla. W metodzie tej zakłada się, że emisja ditlenku węgla od ludzi jest znana i stała w czasie. Przyjmuje się również brak innych źródeł CO_2 . W metodzie zaniku stężenia ditlenku węgla zakłada się, że budynek opuścili ludzie stanowiący jedyne źródło CO_2 a stężenie zanika w czasie do poziomu stężenia ditlenku węgla w otoczeniu.

Osiągnięcie stanu ustalonego w czasie pomiarów w pomieszczeniach słabo wentylowanych jest bardzo trudne, dlatego bardzo często do określania liczby wymian powietrza wykorzystywane są tylko fragmenty krzywych narastania lub zaniku ditlenku węgla w danej strefie pomiarowej [47, 58].

Bardzo istotne z punktu widzenia pomiarów stężenia ditlenku węgla jest miejsce usytuowania czujnika. W metodzie tej zakłada się jednorodne stężenie ditlenku węgla podobnie jak dla innych metod wykorzystujących gazy znacznikowe emitowane z butli. W przypadku gazów emitowanych z butli wykorzystuje się dodatkowe mieszanie powietrza pozwalające na uzyskanie jednorodnego stężenia znacznika w pomieszczeniu. W pomiarach metabolicznego ditlenku węgla nie stosuje się dodatkowego mieszania powietrza, a CO_2 podlega naturalnej dystrybucji w pomieszczeniu. Do optymalizacji rozmieszczenia czujników podczas pomiarów wykorzystano wyniki obliczeń symulacyjnych uzyskanych dzięki zastosowaniu numerycznej mechaniki płynów (CFD).

Rozdział 3

Pomiary stężenia metabolicznego ditlenku węgla w wybranych obiektach

Badania wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych z zastosowaniem wydychanego przez ludzi ditlenku węgla polegają na pomiarze czasowych przebiegów stężenia CO₂ w pojedynczym punkcie w każdym pomieszczeniu. Zakłada się przy tym jednorodne stężenie ditlenku węgla w całym pomieszczeniu. Występujący w rzeczywistości rozkład stężenia wydychanego przez ludzi ditlenku węgla nie jest jednorodny i ulega dużym wahaniom w obrębie strefy. Dlatego pomiar stężenia CO₂ w pomieszczeniu powinien być reprezentatywny dla średniego stężenia ditlenku węgla w całym pomieszczeniu.

Norma [9] dopuszcza, aby w różnych punktach badanej przestrzeni stężenie CO₂ nie przekraczało więcej niż 10 % średniego stężenia w całym pomieszczeniu. Zalecane jest również sprawdzenie jednorodności stężenia wewnątrz analizowanej strefy pomiarowej poprzez pomiary w kilku punktach pomieszczenia. Sprawdzenie rozkładu stężenia CO₂ w pomieszczeniu jest możliwe poprzez rozmieszczenie kilku czujników w różnych punktach pomieszczenia w nocy w czasie snu mieszkańców lub w czasie ich nieobecności.

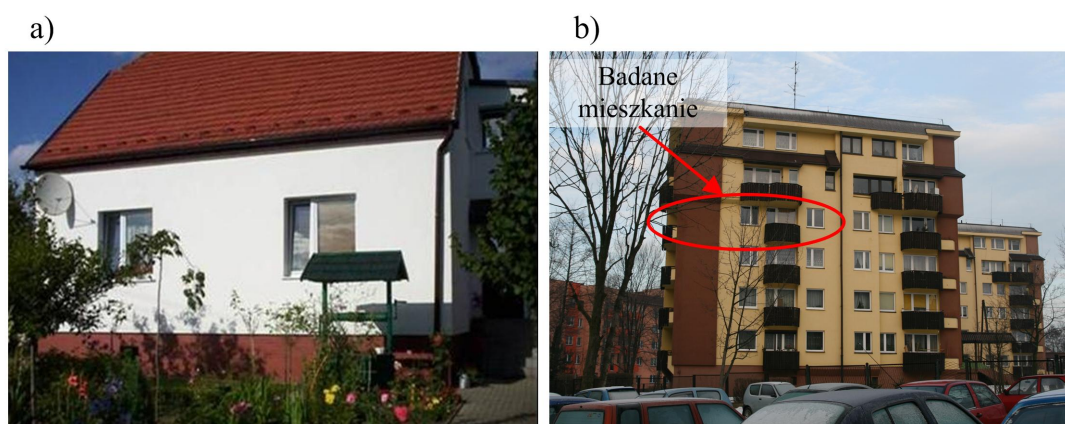
W literaturze można znaleźć wyniki badań eksperymentalnych pomiaru stężenia ditlenku węgla w różnych punktach w obrębie jednego pomieszczenia. Naydenov i in. [65] badali rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu mieszkalnym. Uzyskali oni odchylenia od wartości średniej stężenia ditlenku węgla (z siedmiu czujników) do 50 ppm w czasie nieobecności mieszkańców i do 270 ppm w nocy w czasie snu. Miejsca o największym odchyleniu stężenia ditlenku węgla od wartości średniej zaobserwowano nad człowiekiem oraz blisko okna. Jako miejsca o niewystarczającym mieszaniu autorzy wskazują również miejsca w okolicach grzejnika i w pobliżu ścian [65]. Podobne badania tylko w komorze klimatycznej prowadzili Barankova [46] i Mahyuddin [68]. Mahyuddin zaobserwowała wyższe stężenia ditlenku węgla w wyższych partiach pomieszczenia (powyżej 1,8 m) a nie jak oczekiwano w strefie przebywania ludzi na wysokości 1,2 m [68].

W niniejszej pracy przeprowadzono pomiary rozkładu stężenia ditlenku węgla w pojedynczym pomieszczeniu i pomiary stężenia ditlenku węgla w dwóch mieszkaniach dwu i cztero-pokojowym. Wyniki pomiarów rozkładu stężenia ditlenku węgla wykorzystano do walidacji

numerycznego modelu rozprzestrzeniania się wydychanego CO₂ w pomieszczeniu (rozdział 5.3). Na podstawie zmierzonych czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla w różnych pomieszczeniach określono intensywność wentylacji pomieszczeń. Wyniki obliczeń intensywności wentylacji w badanych mieszkaniach przedstawiono w rozdziale 4.

3.1 Metoda pomiarów

Pomiarami objęte zostały dwa mieszkania w Knurowie. Jedno usytuowane w budynku jednorodzinny (Mieszkanie I - rysunek 3.1a), a drugie w pieciokondygnacyjnym budynku wielorodzinnym (Mieszkanie II - rysunek 3.1b). Budynek jednorodzinny jest dwukondygnacyjny zbudowanym z cegły i ocieplonym styropianem. W budynku tym zamontowane są okna plastikowe. Pomiar przeprowadzono tylko na dolnej kondygnacji budynku. Budynek wielorodzinny jest ocieplony tylko powyżej trzeciej kondygnacji. Ocieplenie nie obejmuje ścian zewnętrznych badanego mieszkania. W mieszkaniu tym zamontowano okna plastikowe. W obydwu budynkach działa wentylacja grawitacyjna. Powietrze napływa do budynku przez otwory i nieszczelności w stolarnie okiennej i drzwiowej, natomiast usuwane jest z budynku przewodami wentylacji grawitacyjnej. Założono że jedynym źródłem ditlenku węgla w pomieszczeniach są ludzie.



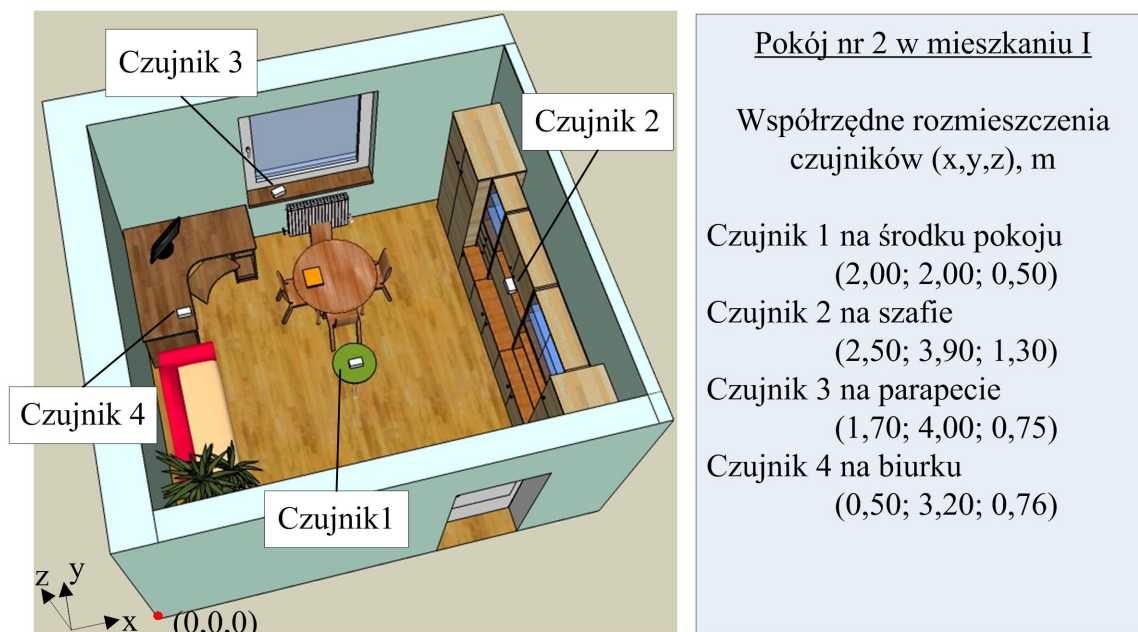
Rysunek 3.1: Budynki mieszkalne objęte pomiarami a) Mieszkanie I, b) Mieszkanie II

Pomiary rozprzestrzeniania się metabolicznego ditlenku węgla dla potrzeb walidacji modelu numerycznego

Pomiary rozprzestrzeniania się wydychanego ditlenku węgla wykonano w pokoju nr 2 w mieszkaniu I (rysunek 3.4) i w pokoju nr 1 w mieszkaniu II (rysunek 3.5).

Badania w pokoju nr 2 (w mieszkaniu I) miały charakter orientacyjny i pozwoliły na określenie przestrzennych różnic stężenia ditlenku węgla w obrębie pomieszczenia. Pomiar były prowadzone w sposób ciągły przez 9 dni od 28.01 - 05.02.2005. W czasie pomiarów w pokoju spały dwie osoby. Drzwi do pomieszczenia były w czasie pomiarów zamykane. W pomiarach

tych wykorzystano cztery czujniki ditlenku węgla. Decydując o rozmieszczeniu czujników CO₂ wewnątrz pomieszczenia posłużyliśmy się dostępnymi w literaturze wynikami badań in situ [65]. Na rysunku 3.2 przedstawiono rozmieszczenie czterech czujników ditlenku w pokoju 2.

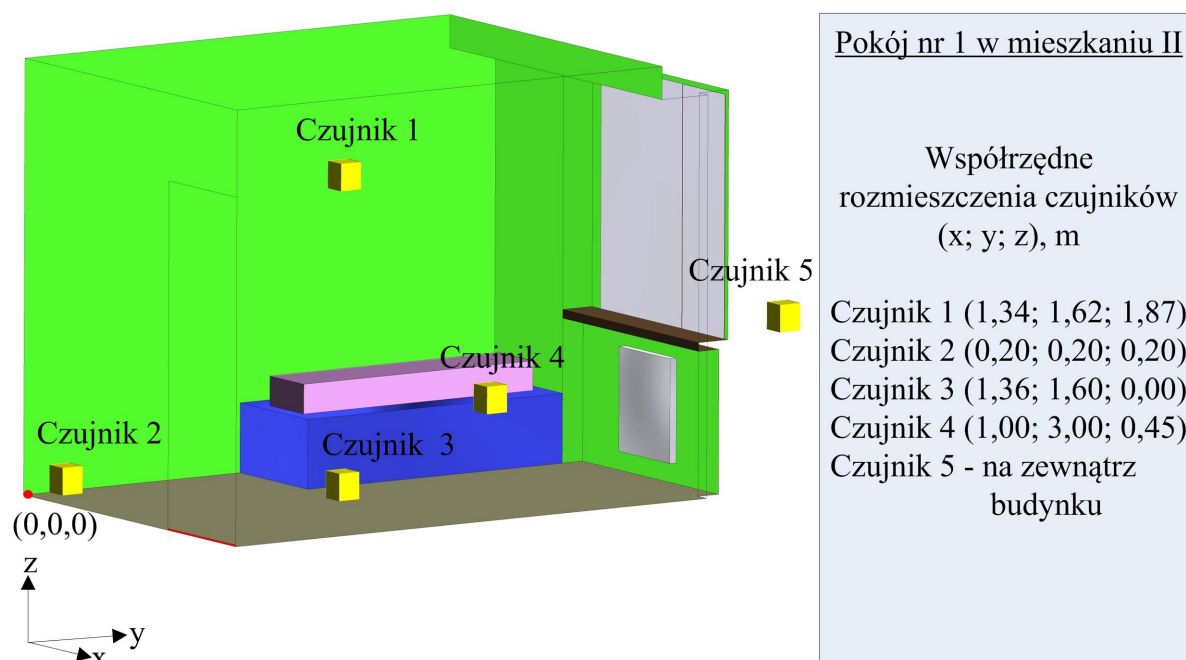


Rysunek 3.2: Rozmieszczenie czujników CO₂ w pokoju nr 2 w mieszkaniu I

Właściwe badania rozkładu stężenia ditlenku węgla dla potrzeb walidacji modelu numerycznego wykonano w pokoju nr 1 w mieszkaniu II. Pomiary te przeprowadzono w godzinach nocnych dla trzech kolejnych dni na początku maja 2009 roku (5-7.05.2009). W trakcie pomiarów w pomieszczeniu spała jedna osoba. Przed rozpoczęciem każdej serii pomiarowej pomieszczenie było wietrzone aż do uzyskania jednorodnych parametrów powietrza. Stężenie ditlenku węgla mierzono w czterech punktach pomieszczenia oraz na zewnątrz budynku (rysunek 3.3). Wybrano skrajne punkty (pod sufitem - czujnik 1, róg pokoju - czujnik 2, podłoga - czujnik 3, obok łóżka śpiącego człowieka- czujnik 4), które pozwoliły na ocenę maksymalnych różnic w zmierzonych wartościach stężenia CO₂ w obrębie pomieszczenia. Dodatkowym parametrem mierzonym w czasie pomiarów była prędkość powietrza w szczelinie pod drzwiami, która pozwoliła na określenie strumienia powietrza przepływającego przez pomieszczenie.

Pomiary stężenia ditlenku węgla w mieszkaniach dla określania intensywności wentylacji

Dla potrzeb określenia intensywności wentylacji w pomieszczeniach przeprowadzono pomiary stężenia CO₂ w dwóch mieszkaniach. Każde z mieszkań podzielono na strefy pomiarowe. Pojedynczą strefę pomiarową w mieszkaniu stanowiły pomieszczenia oddzielone od po-

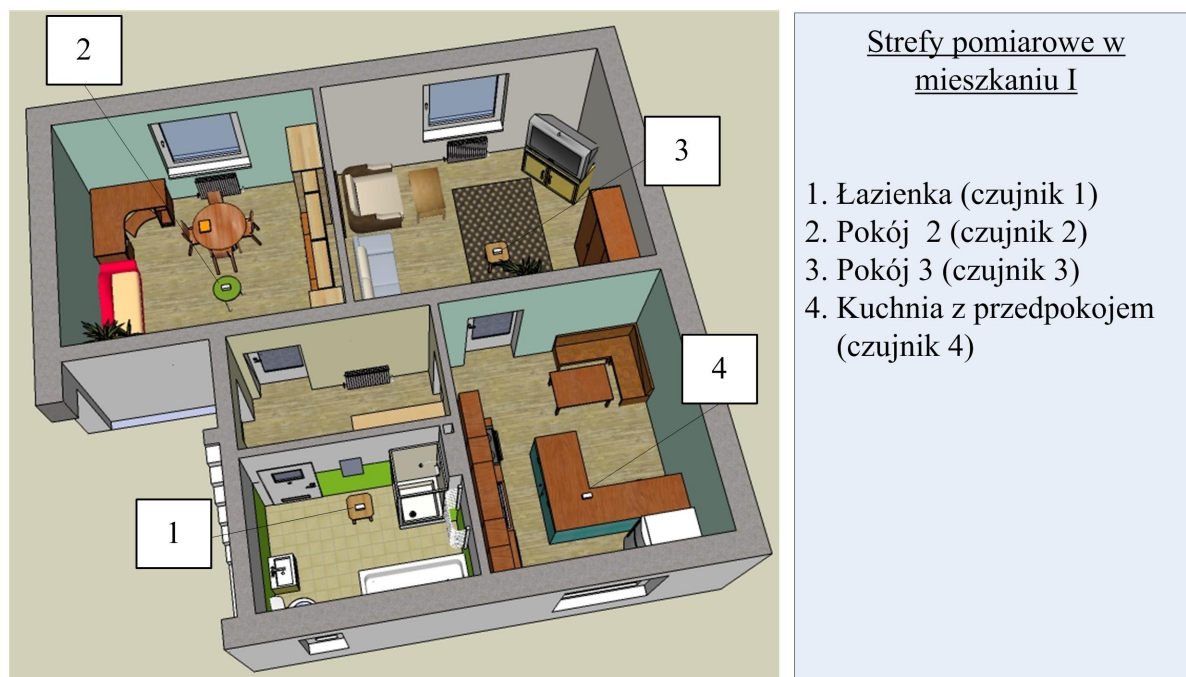


Rysunek 3.3: Rozmieszczenie czujników CO₂ w pokoju nr 1 w mieszkaniu II

zostałych zamkniętymi drzwiami. W każdej strefie pomiarowej umieszczono po jednym czujniku CO₂. Czujniki rozmieszczono na podstawie wytycznych zawartych w normach [42, 43] dotyczących warunków prowadzenia pomiarów wymiany powietrza metodą gazów znacznikowych. W normach tych przyjmuje się, że stężenie ditlenku węgla w reprezentatywnym miejscu pomiaru nie powinno różnić się więcej niż 10 % od średniej wartości stężenia w strefie pomiarowej. Na rysunkach 3.4 i 3.5 przedstawiono podział obydwu mieszkań na strefy pomiarowe oraz rozmieszczenie czujników. Mieszkanie I podzielono na cztery strefy pomiarowe, a mieszkanie II na 6 stref. Dodatkowo w mieszkaniu II rejestrowano stężenie ditlenku węgla na zewnątrz budynku. W mieszkaniu I spały dwie osoby po jednej w pokoju nr 2 i 3. W ciągu dnia liczba użytkowników mieszkania zmieniała się od 0 do 4 osób. W mieszkaniu II w czasie pomiarów przebywały trzy osoby, dwie dorosłe i ośmiomiesięczne dziecko. W nocy wszyscy spali w sypialni.

Przyrządy pomiarowe zastosowane w pomiarach

W mieszkaniu I mierzono stężenie ditlenku węgla, temperaturę i wilgotność względną powietrza. Pomiar stężenia CO₂ i temperatury wykonano za pomocą czujników SenseAir 2001 VT. Czujnik ten mierzy stężenie CO₂ w zakresie od 0 do 3000 ppm z dokładnością 50ppm + 5% wskazania czujnika. Zakres pomiaru temperatury w czujniku SenseAir wynosi -9,9 ÷ +60 °C z dokładnością do 0,5 °C. Wilgotność względną mierzono czujnikiem HUMITTER 50U firmy VAISALA o zakresie pomiarowym 0 ÷ 100 %. Dokładność pomiaru czujnika wilgotności w temperaturze 20 °C wynosi 5%. Mierzone parametry rejestrowano z minutowym krokiem



Rysunek 3.4: Podział mieszkania I na strefy pomiarowe z rozmieszczeniem czujników CO₂

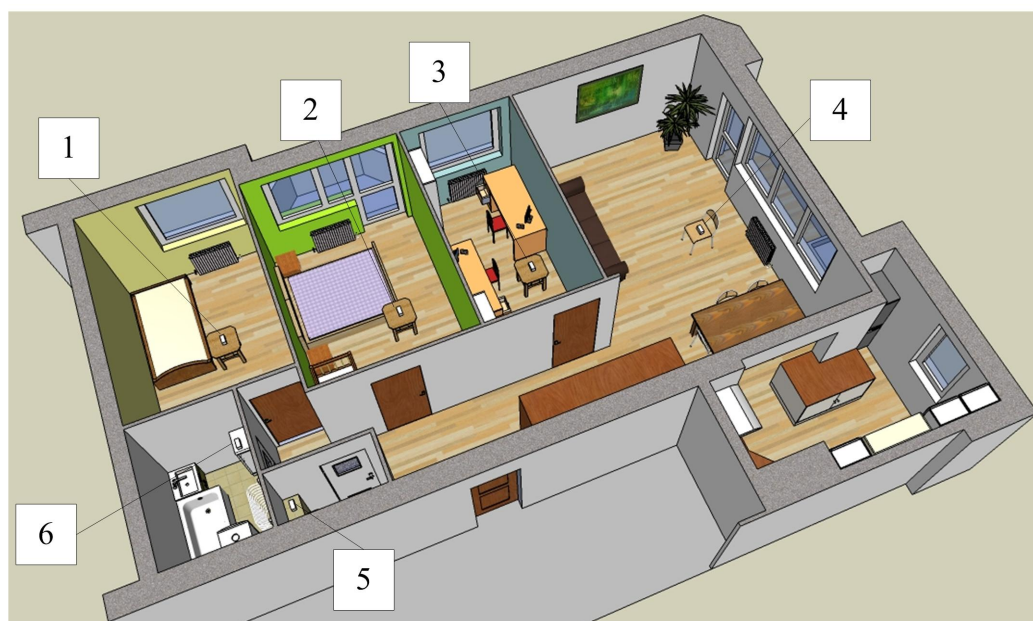
czasowym.

W pomiarach w mieszkaniu II wykorzystano Monitory Jakości Powietrza Wewnętrzne PS30. Monitory te posiadają wbudowane czujniki stężenia ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej oraz ciśnienia barometrycznego. Monitory PS30 rejestrowały dane pomiarowe z minutowym krokiem czasowym. Dane techniczne monitorów PS30 podano w tablicy 3.1. Przed rozpoczęciem pomiarów czujniki CO₂ były kalibrowane.

Tablica 3.1: Dane techniczne Monitora Jakości Środowiska Wewnętrzne PS30

Parametr	Zakres pomiarowy	Dokładność wskazań
Stężenie ditlenku węgla, ppm	0 ÷ 5000	± (20 ppm + 3% mierzonej wartości)
Wilgotność względna %	0 ÷ 100	± 3,5
Temperatura powietrza, °C	10 ÷ 45	± 0,5
Ciśnienie barometryczne, hPa	900 ÷ 1100	± 3

W pokoju nr 1 (w mieszkaniu II) zmierzono również prędkość powietrza w szczelinie pod drzwiami i temperatury wewnętrznych powierzchni, które pozwoliły na określenie warunków brzegowych i początkowych dla modelu numerycznego rozprzestrzeniania się ditlenku węgla (rozdział 5.3.3). Temperaturę powierzchni ścian i okna zmierzono za pomocą termopar. Dziewięć termopar zostało przymocowanych do ścian, dwie do okna jedną umieszczono na zewnątrz pomieszczenia. Temperaturę powierzchni śpiącego człowieka przykrytego kołdrą zmierzono za



Strefy pomiarowe w mieszkaniu II

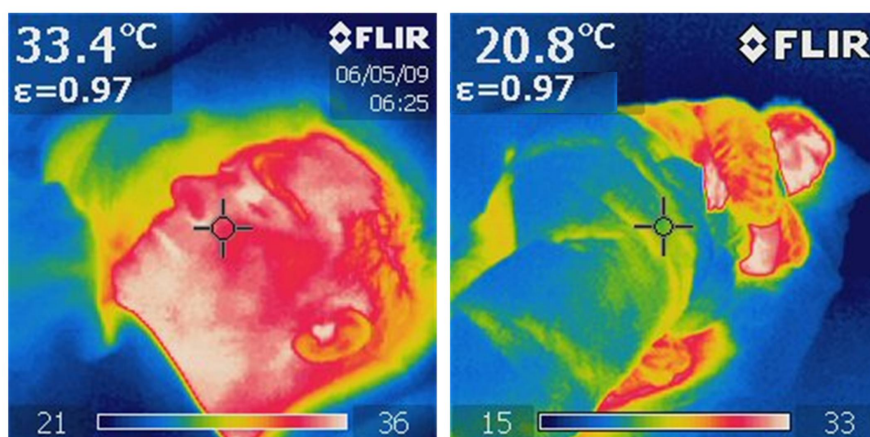
- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Pokój nr 1 (czujnik 1) | 5. WC (czujnik 5) |
| 2. Sypialnia (czujnik 2) | 6. Łazienka (czujnik 6) |
| 3. Pokój do pracy (czujnik 3) | |
| 4. Pokój dzienny z kuchnią
i przedpokojem (czujnik 4) | |

Rysunek 3.5: Podział mieszkania II na strefy pomiarowe z rozmieszczeniem czujników CO₂

pomocą kamery termowizyjnej (rysunek 3.6) firmy FLIR. Prędkość i temperaturę powietrza w szczelinie pod drzwiami zmierzono za pomocą termoanemometru AP471-AS firmy Delta OHM w półminutowych interwałach czasu (rysunek 3.7). Dane techniczne anemometru przedstawiono w tabelicy 3.2.

Tablica 3.2: Dane techniczne termoanemometru AP471-AS firmy Delta OHM

Parametr	Zakres pomiarowy	Dokładność wskazań
Prędkość, m/s	0,4 ÷ 40	± 0,1 m/s (0 ÷ 0,99 m/s) ± 0,3 m/s (1 ÷ 9,99 m/s) ± 0,8 m/s (10 ÷ 40,09 m/s)
Temperatura, °C	-25 ÷ 80	± 0,8 °C (-10 ÷ 80 °C)



Rysunek 3.6: Pomiar kamerą termowizyjną rozkładu temperatury powierzchni zewnętrznej człowieka



Rysunek 3.7: Pomiar termooanemometrem prędkości powietrza w szczelinie pod drzwiami

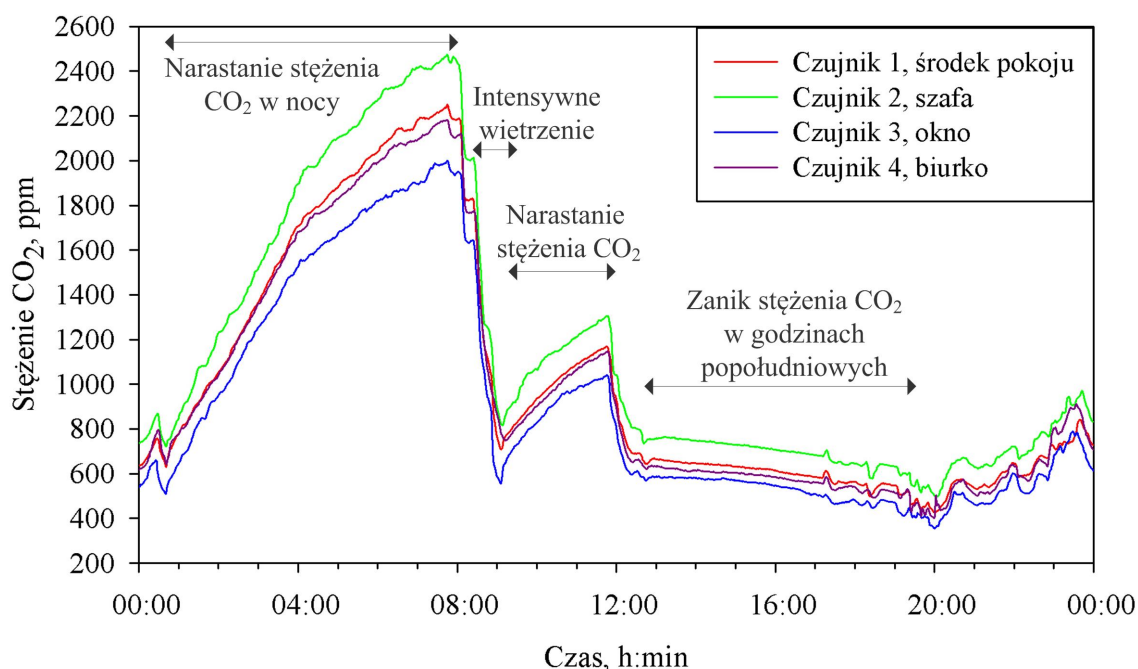
3.2 Wyniki pomiarów

3.2.1 Wyniki pomiarów rozprzestrzeniania się metabolicznego ditlenku węgla dla potrzeb walidacji modelu numerycznego

Wyniki pomiarów w pokój nr 2 w mieszkaniu I (rysunek 3.4)

Czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla mierzone w czterech punktach pomiarowych dla pomiarów w dniu 3.02.2005 przedstawiono na rysunku 3.8. Wartości zmierzonych stężeń CO_2 porównano z wartością średnią obliczoną jako średnią arytmetyczną wartości zmierzonych przez cztery czujniki. W nocy największe różnice między wskazaniem czujników a wartością średnią występowały dla czujnika umieszczonego przy oknie (29-264 ppm) i na szafie (22 - 278 ppm). Minimalne odchylenie od wartości średniej stężenia uzyskano dla czujnika nr 1 usytuowanego na środku pokoju (2 - 59 ppm). W ciągu dnia maksymalne odchylenie stężenia

CO₂ od wartości średniej nie przekroczyły 170 ppm dla czujników 3 i 4 umieszczonych na oknie i na szafie. Dla czujnika 4 umieszczonego na biurku maksymalne różnice stężenia do 163 ppm pojawiały się gdy osoba pracowała przy biurku. Odchylenia od wartości średniej stężenia dla czujnika nr 1 umieszczonego na środku pokoju zawierały się w granicach 6 - 52 ppm. Średnie procentowe w czasie pomiarów odchylenie wynosiło prawie 0% dla czujnika 1 na środku pokoju, 68% dla czujnika 2 na szafie, 43% dla czujnika 3 na oknie i 1% dla czujnika 4 na biurku. Największe różnice wskazań pomiędzy czujnikami występują przy zamkniętym oknie i drzwiach (minimalna wentylacja pomieszczenia). W trakcie intensywnego wietrzenia stężenia CO₂ mierzone w czterech punktach pokoju bardzo szybko się wyrównują (8:27-9:05 na rysunku 3.8). Kryterium reprezentatywnych punktów pomiaru na podstawie wymagań z norm [42, 43] spełniają punkty w których umieszczono czujniki 1 i 4.



Rysunek 3.8: Stężenie ditlenku węgla zarejestrowane w czterech punktach w pokoju 2 w Mieszkanie I

Wyniki pomiarów w pokój nr 1 w mieszkaniu II (rysunek 3.5)

Na rysunku 3.9 przedstawiono czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej powietrza zmierzone w czterech punktach w pokoju nr 1 (w mieszkaniu II). Przedstawione na rysunku 3.9 wyniki pomiarów przeprowadzono w dniu 6.04.2009 w godzinach nocnych od 03:18 - 06:23. Przed pomiarami pomieszczenie było wietrzone aż do uzyskania jednorodnych parametrów powietrza w pomieszczeniu. Pomimo tego rejestrowane przez czujniki stężenie CO₂ nie jest jednakowe w różnych punktach pomieszczenia. Najwyższe wartości stężenia ditlenku występują dla czujnika 1 umieszczonego pod sufitem. Podobne wyniki badań uzyskali [68]. Dla każdego z punktów pomiarowych określono procentowe odchylenie

wartości mierzonych przez czujnik od wartości średniej obliczonej jako średnia arytmetyczna wartości stężenia CO₂ zmierzonego przez cztery czujniki. Dla każdego punktu zaobserwowano chwilowe przekroczenia dopuszczalnych przez normy [42, 43] 10% różnic stężenia CO₂ od wartości średniej w pomieszczeniu. Jednakże odchylenia uśrednione dla całego okresu pomiarów w żadnym punkcie pomiarowym nie przekraczają 10% wartości średniego stężenia w pomieszczeniu. Analizując wyniki dla wszystkich trzech dni pomiarowych zaobserwowano, że wyższe wartości stężenia CO₂ występują w górnych partiach pomieszczenia a niższe w dolnych.

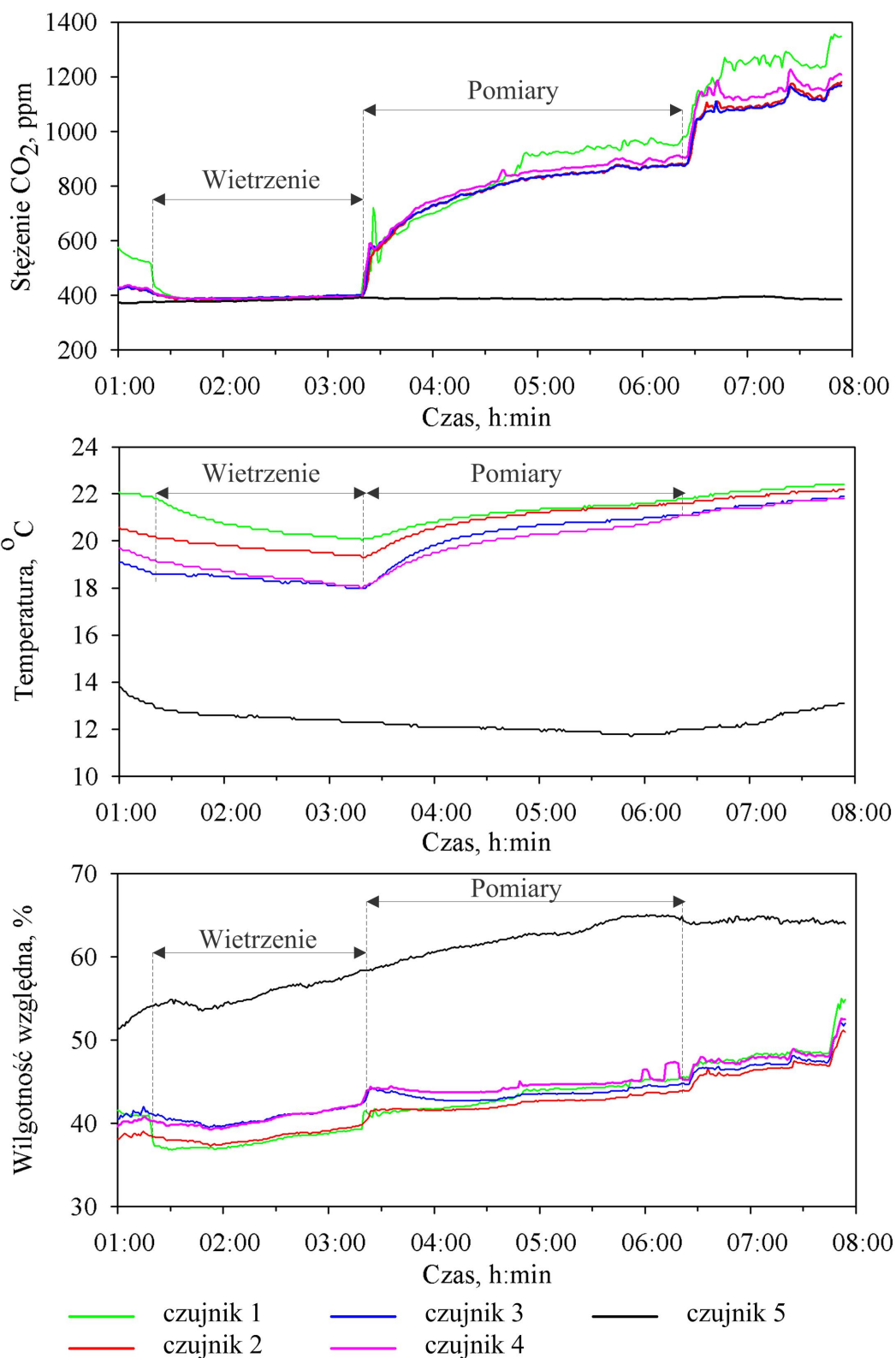
Wyniki pomiarów pozwoliły jedynie na określenie pojedynczych punktów spełniających wymagania reprezentatywnych miejsc pomiaru CO₂. Ograniczona liczba punktów pomiarowych nie pozwala na stworzenie map stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Dlatego dalsze badania rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu prowadzono wykorzystując modelowanie numeryczne.

Na rysunku 3.10 przedstawiono zarejestrowane wartości temperatury powierzchni przegród w pomieszczeniu, powierzchni okna oraz temperatury powietrza zewnętrznego. Po rozpoczęciu pomiarów występuje wzrost stężenia CO₂ w pomieszczeniu oraz temperatury powierzchni ścian przy czym zmiana temperatury nie przekracza 1K. Największy wzrost temperatury występuje na powierzchni okna i jest on związany z wpływem promieniowania słonecznego o wschodzie słońca (ok. 5.30 rano). Wartości prędkości w szczelinie pod drzwiami zmierzone w czasie pomiarów przedstawiono na rysunku 3.11. Na podstawie uśrednionych w czasie prędkości określono objętościowy strumień powietrza przepływającego przez pomieszczenie, który dla pomiarów z 6.05.2009 odpowiadał jednej wymianie powietrza na godzinę.

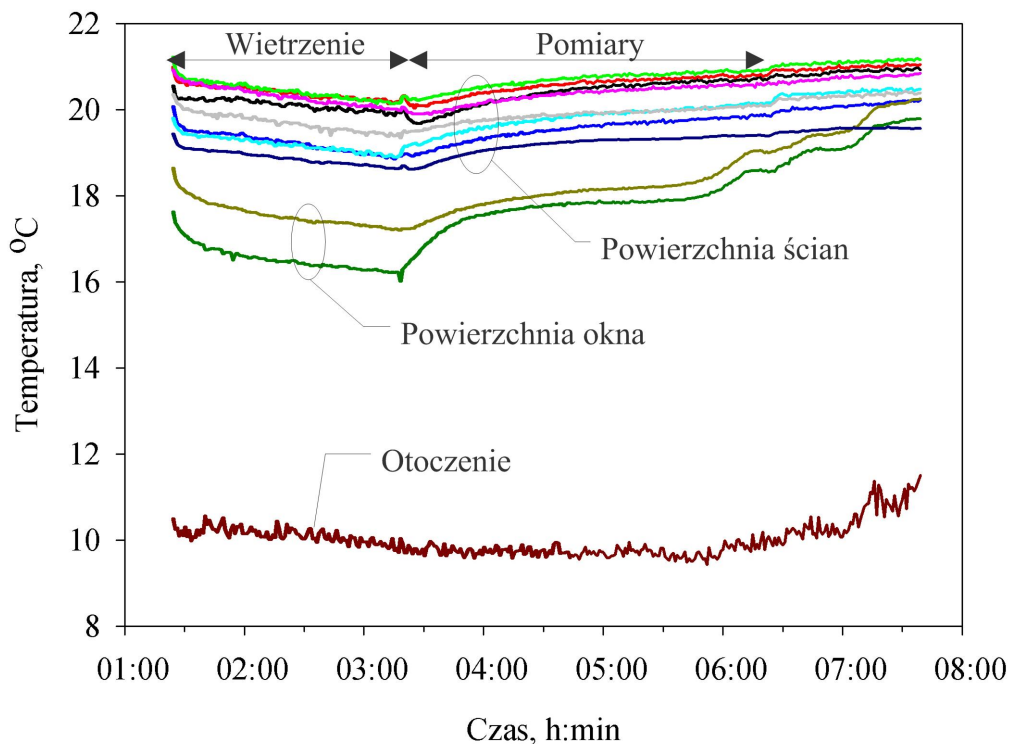
3.2.2 Wyniki pomiarów stężenia ditlenku węgla w mieszkaniach dla określenia intensywności wentylacji

Pomiary stężenia ditlenku węgla w mieszkaniu I wykonano w czterech strefach pomiarowych. Na rysunku 3.12 przedstawiono czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla zarejestrowane w mieszkaniu I w czasie pomiarów 31.03- 05.04.2005. Szczególnie wysokie stężenia zarejestrowano w pokoju nr 2 i 3 w godzinach nocnych. Stężenie w pokojach tych wzrasta do 1500 ppm przy jednej osobie śpiącej w pokoju. Dla dwóch osobach śpiących w pokoju nr 2 (mieszkanie I) obserwowano stężenia powyżej 2500 ppm (rysunek 3.8). W ciągu dnia mieszkanie było najczęściej puste i wówczas stężenie ditlenku węgla spadało poniżej 1000 ppm.

Pomiary w mieszkaniu II przeprowadzono w dniach 2.04 -22.04.2009. W mieszkaniu wyodrębniono 6 stref pomiarowych. Zmierzone czasowe przebiegi ditlenku węgla w każdej strefie przedstawiono na rysunku 3.13. Najwyższe wartości stężenia zaobserwowano w nocy w sypialni gdzie spały 3 osoby i osiągało wartość do 2800 ppm. Przez większość czasu stężenie ditlenku węgla w tym mieszkaniu utrzymuje się na poziomie poniżej 1500 ppm co wynika z prawie ciągłej obecności dwóch osób w mieszkaniu. W obydwu mieszkaniach obserwowano znaczący wzrost stężenia ditlenku węgla w nocy w pokojach w których spali ludzie. W ciągu dnia przy zamkniętych drzwiach pomiędzy pomieszczeniami również obserwowano wzrost stę-



Rysunek 3.9: Rozkład czasowy stężenia ditlenku węgla, temperatury i wilgotności względnej w pokoju nr 1 w mieszkaniu II i w na zewnątrz budynku dla pomiarów w dniu 06.04.2009

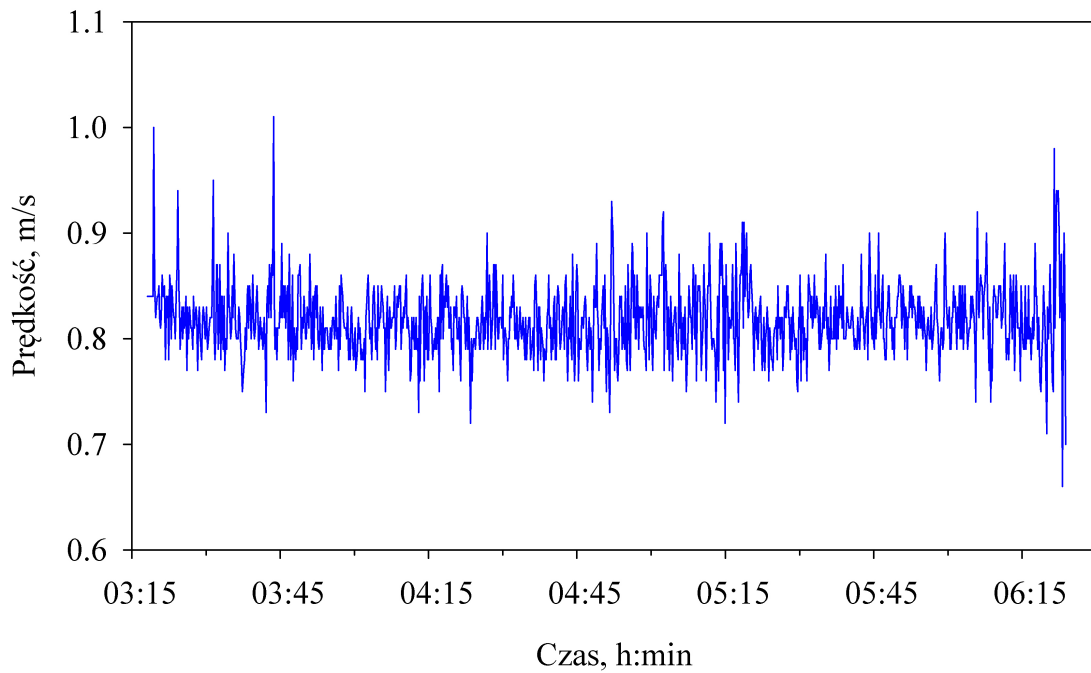


Rysunek 3.10: Rozkład czasowy temperatury powierzchni ścian, okna oraz temperatura otoczenia w pokoju nr 1 w mieszkaniu II (pomiary 06.04.2009)

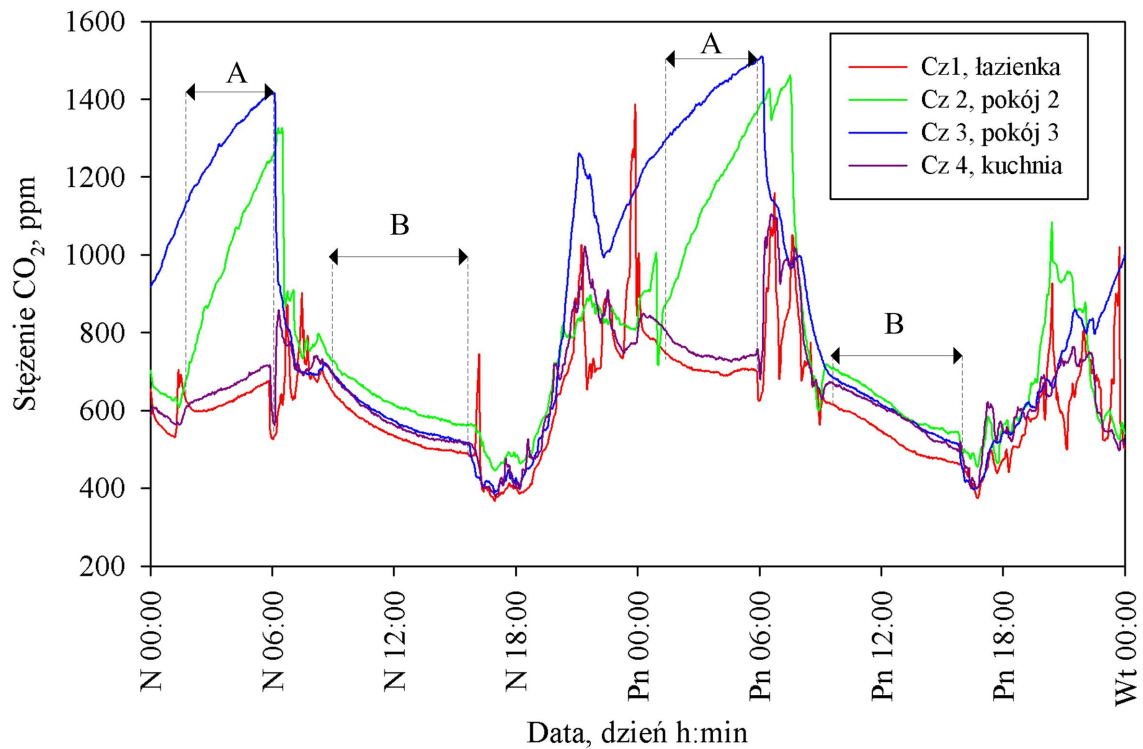
zenia ditlenku węgla powyżej 1000 ppm w tych pokojach w których przebywali ludzie.

Wyniki pomiarów świadczą o niewystarczającej wentylacji badanych pomieszczeń. W źle wentylowanych budynkach z ograniczonym napływem świeżego powietrza z zewnątrz dużą rolę w wymianie powietrza odgrywają międzystrefowe przepływy powietrza pomiędzy pomieszczeniami. Świadczą o tym wyniki pomiarów dla pomieszczeń nr 1 i 4 w mieszkaniu I gdzie przy zamkniętych drzwiach obserwowano w nocy przyrost stężenia ditlenku węgla przy braku ludzi (rysunek 3.12). Otwarcie drzwi pomiędzy pomieszczeniami o dużych różnicach stężenia CO_2 powoduje bardzo szybkie wyrównanie stężeń.

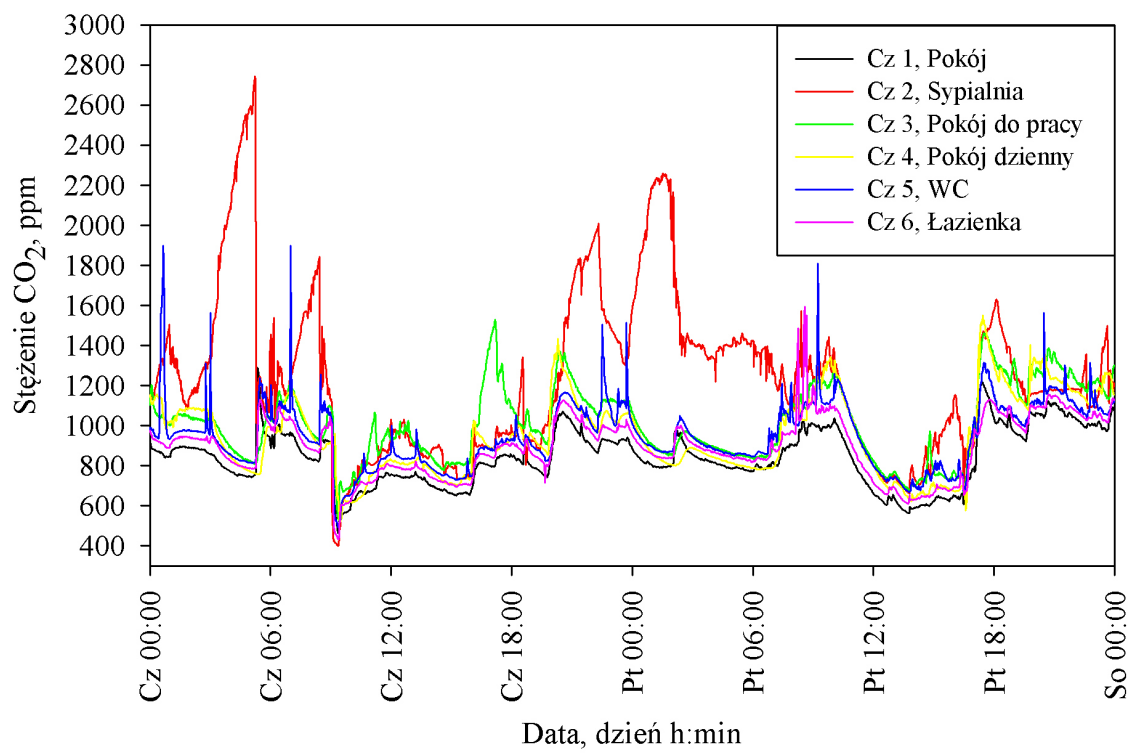
Zarejestrowane w czasie pomiarów czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach wykorzystano do obliczeń wymiany i międzystrefowych przepływów powietrza w mieszkaniach (rozdział 4). Dla potrzeb obliczeń wyselekcjonowano monotoniczne przebiegi stężenia ditlenku węgla. Na rysunku 3.12 wyodrębniono przykładowe okresy narastania stężenia CO_2 (A) i okres zaniku (B).



Rysunek 3.11: Prędkość powietrza zmierzona w szczelinie pod drzwiami w pokoju nr 1 w mieszkaniu II (pomiar 06.04.2009)



Rysunek 3.12: Stężenie ditlenku węgla zarejestrowane w czasie pomiarów w mieszkaniu I, A - okres narastania stężenia CO_2 , B - okres zaniku stężenia CO_2



Rysunek 3.13: Stężenie ditlenku węgla zarejestrowane w czasie pomiarów w mieszkaniu II

Rozdział 4

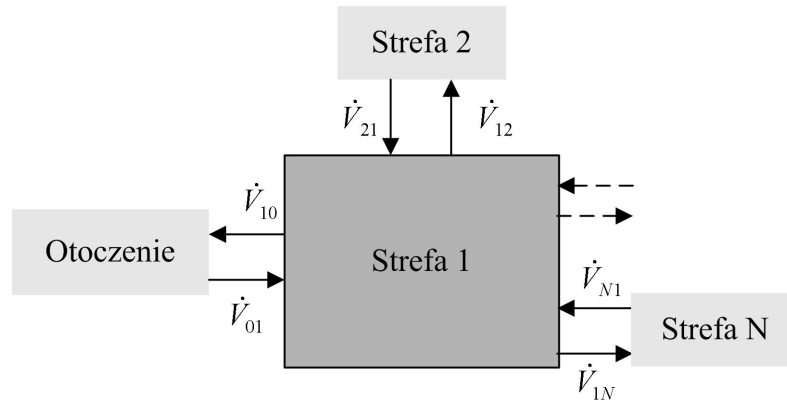
Modelowanie matematyczne wymiany powietrza

Metody znacznikowe badania wymiany powietrza w budynkach bazują na pomiarach stężenia gazu znacznikowego. Wśród powszechnie stosowanych gazów zastosowanie znajduje również ditlenek węgla wydychany przez ludzi. Posiadając dane na temat emisji metabolicznego ditlenku węgla i rozkładów jego stężenia w powietrzu można analizować wpływ otworów wentylacyjnych i nieszczelności w konstrukcji budynku na proces wentylacji grawitacyjnej. Identyfikację wymiany powietrza w budynkach przeprowadza się wykorzystując jedno lub wielostrefowe modele przepływów powietrza. Model jednostrefowy umożliwia określenie ilości powietrza wymienianego pomiędzy daną strefą i otoczeniem. Dla identyfikacji wewnętrznych strumieni powietrza przepływającego pomiędzy sąsiadującymi ze sobą strefami oraz między strefami i otoczeniem należy dysponować modelem międzystrefowych strumieni powietrza. Dla potrzeb niniejszej pracy opracowano model matematyczny i program w języku *Fortran* do identyfikacji międzystrefowych przepływów powietrza gdy jedynym źródłem ditlenku węgla w pomieszczeniach jest człowiek.

4.1 Model matematyczny

Modele międzystrefowych przepływów powietrza zakładają dwukierunkowe przepływy powietrza pomiędzy budynkiem i otoczeniem oraz pomiędzy sąsiadującymi za sobą strefami. Na rysunku 4.1 przedstawiono układ strumieni powietrza w modelu wielostrefowym. Każde pomieszczenie w budynku z zamkniętymi drzwiami traktowane jest jako oddzielna strefa. Zakłada się jednorodne stężenie gazu znacznikowego w każdej ze stref oraz stałą wartość stężenia gazu znacznikowego w otoczeniu. Powietrze traktuje się jako płyn nieściśliwy.

Przy powyższych założeniach w budynku podzielonym na N stref pomiarowych bilans ditlenku węgla w każdej strefie można zapisać równaniem różniczkowym zwyczajnym pierw-



Rysunek 4.1: Schemat modelu międzystrefowych przepływów powietrza

szego rzędu w postaci:

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^N \dot{V}_{ji} \cdot C_j(t) - C_i(t) \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^N \dot{V}_{ij} + \dot{V}_{e,i}, \quad i = 1 \dots N \quad (4.1)$$

gdzie: V_i jest objętością i -tej strefy pomiarowej (pomieszczenia), C_i i C_j są stężeniami CO_2 w rozpatrywanej i -tej strefie pomiarowej oraz strefach sąsiednich, \dot{V}_{ji} to strumień powietrza przepływający ze strefy j -tej do strefy i -tej, N jest całkowitą liczbą stref pomiarowych, $\dot{V}_{e,i}$ jest emisją metabolicznego CO_2 w i -tej strefie, t określa czas. Warunek początkowy został sformułowany w postaci:

$$C_i(0) = C_{i0} \quad (4.2)$$

gdzie: C_{i0} jest stężeniem CO_2 w i -tej strefie w chwili $t=0$.

Zakładając stan ustalony przepływów powietrza pomiędzy strefami oraz otoczeniem wynikający z istniejących nieszczelności i rozkładu ciśnień oraz stałą gęstość gazu dla każdej ze stref pomiarowych sformułowano dodatkowo bilans strumieni powietrza w postaci:

$$\sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^N \dot{V}_{ji} = \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^N \dot{V}_{ij} \quad (4.3)$$

gdzie: indeks równy zero odnosi się do środowiska zewnętrznego. Powyższe zależności wyrażają matematyczny zapis warunku, że suma strumieni powietrza dopływających do stref jest równa sumie strumieni wypływających.

Układ równań różniczkowych 4.1 wraz z warunkiem początkowym 4.2 można rozwiązać pod warunkiem, że znane są:

- objętości stref pomiarowych V_i ,
- emisje gazu znacznikowego $\dot{V}_{e,i}$,

- oraz strumienie powietrza przepływającego pomiędzy strefami $\dot{V}_{i,j}$.

Tak sformułowane zadanie zaliczane jest do zadań bezpośrednich. Objętości stref obliczeniowych są znane z konstrukcji budynku, natomiast emisję CO₂ od pojedynczego człowieka obliczono z zależności 2.11 podanej w rozdziale 2.3.2. Początkowy rozkład stężenia gazu znacznikowego w pomieszczeniach określa się na podstawie pomiarów.

Strumienie powietrza międzystrefowego są funkcją wielkości nieszczelności oraz rozkładu ciśnień. Pomiarowa identyfikacja strumieni jest trudna i obciążona znacznymi błędami. Mając to na uwadze zaproponowano metodę poszukiwania międzystrefowych przepływów powietrza w oparciu o warunek minimum sumy kwadratów odchyleń stężenia ditlenku węgla z obliczeń i pomiarów w poszczególnych strefach i wybranych chwilach czasu. Warunek ten w zapisie matematycznym ma postać:

$$S(\dot{\mathbf{V}}) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^N \left(C_i^*(t_p) - C_i(t_p, \dot{\mathbf{V}}) \right)^2 \rightarrow MIN \quad (4.4)$$

gdzie:

S - to wartość funkcji celu,

$\dot{\mathbf{V}}^T = [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_L]$ - jest wektorem estymowanych strumieni powietrza w oparciu o kryterium 4.4,

$C_i^*(t_p)$ i $C_i(t_p, \dot{\mathbf{V}})$ - to wartość zmierzona i obliczona stężenia ditlenku węgla w i -tej strefie i w chwili czasu t_p ,

N - oznacza liczbę stref pomiarowych,

P - to całkowita liczba pomiarów,

$F = L+N$ - oznacza całkowitą liczbą nieznanych strumieni powietrza przy czym L to liczba strumieni estymowanych procedurą optymalizacyjną, natomiast pozostałe N strumieni jest wyliczanych z bilansu strumieni powietrza opisanych zależnością 4.3

Wartość obliczeniową stężenia gazu znacznikowego uzyskuje się z przebiegu czasowego, który jest rozwiązaniem układu równań różniczkowych 4.1 i jest funkcją nieznaną *a priori* strumieni powietrza przepływających pomiędzy strefami oraz pomiędzy strefami i otoczeniem. W budynku składającym się z N stref pomiarowych występuje N^2+N niewiadomych strumieni powietrza w tym N^2-N międzystrefowych przepływów powietrza oraz $2N$ strumieni wymieniających pomiędzy daną strefą i otoczeniem. W rzeczywistych budynkach nie mamy jednak do czynienia z sytuacją, w której każda strefa kontaktuje się z wszystkim pozostałymi strefami. Faktyczna liczba nieznaną strumieni powietrza zależy od konkretnego rozkładu pomieszczeń w budynku.

Poszukiwanie minimum sumy kwadratów odchyleń zmierzonych i wyliczonych stężeń CO₂ 4.4 z uwagi na nieznaną wektor strumieni powietrza $\dot{\mathbf{V}}$ przy dodatkowych ograniczeniach wynikających z równań: 4.1, 4.2 i 4.3 jest zadaniem odwrotnym. Aby rozwiązać to zadanie wykorzystano algorytm optymalizacyjny Levenberga-Marquardta, który rozwiązuje zadanie iteracyjnie [64]. W każdej iteracji konieczne jest jednak rozwiązanie zadania bezpośredniego opisanego przez układ równań różniczkowych 4.1 z warunkami początkowymi 4.2 i układ algebraicznych równań liniowych 4.3.

Analizę dokładności rozwiązania układu równań różniczkowych 4.1 przeprowadzono w oparciu o 3 procedury numeryczne: metodę Eulera, Runge-Kutty 4-go rzędu i metodę Runge-Kutty z adaptacyjnym krokiem czasowym. Dla przeprowadzonych obliczeń najbardziej dokładne rozwiązanie uzyskano dla metody Runge-Kutty z adaptacyjnym krokiem czasowym. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w [85]. Do obliczeń w opracowanym programie wykorzystano jeszcze bardziej dokładną metodę Dormand-Prince 8-go rzędu z adaptacyjnym krokiem czasowym [64]. Gotowe procedury Levenberga-Marquardta i Dormand-Prince 8-go rzędu z adaptacyjnym krokiem czasowym wykorzystano z bazy Numerical Recipes (<http://www.nr.com>).

4.2 Algorytm Levenberga-Marquardta rozwiązania zadania odwrotnego

Algorytm Levenberga-Marquardta wykorzystywany jest do rozwiązania zadań nieliniowych optymalizacji [62]. Jest on szczególnie użyteczny gdy funkcja celu przyjmuje postać sumy kwadratów odchylek pomiędzy wartościami zmierzonymi a wartościami wynikającymi z modelu matematycznego. W niniejszym zadaniu stężenia ditlenku węgla zależą nieliniowo od poszukiwanych wartości strumieni powietrza.

W zapisie macierzowym funkcja celu opisana zależnością 4.4 przyjmuje postać:

$$S(\dot{\mathbf{V}}) = [\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}})]^T [\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}})] \quad (4.5)$$

Wektor $[\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}})]^T$ jest zdefiniowany jako:

$$[\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}})]^T = [C_{1,1}^* - C_{1,1}, \dots, C_{1,P}^* - C_{1,P}, \dots, C_{N,P}^* - C_{N,P}] \quad (4.6)$$

Wyznaczenie minimum normy najmniejszych kwadratów wymaga policzenia pochodnych funkcji $S(\dot{\mathbf{V}})$ dla wszystkich estymowanych strumieni powietrza $\dot{\mathbf{V}}^T = [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_L]$:

$$\frac{\partial S(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{V}_1} = \frac{\partial S(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{V}_2} = \dots = \frac{\partial S(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{V}_L} = 0 \quad (4.7)$$

Po zróżniczkowaniu zależności 4.5 otrzymujemy:

$$\frac{\partial S(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{\mathbf{V}}} = -2 \left[\frac{\partial \mathbf{C}^T(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{\mathbf{V}}} \right] (\mathbf{C}^* - \mathbf{C}) = 0 \quad (4.8)$$

Wyrażenie $\frac{\partial \mathbf{C}^T(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{\mathbf{V}}}$ w równaniu 4.8 nazywane jest macierzą wrażliwości i w formie jawnej ma postać:

$$\mathbf{J}(\dot{\mathbf{V}}) = \left[\frac{\partial \mathbf{C}^T(\dot{\mathbf{V}})}{\partial \dot{\mathbf{V}}} \right]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{1,1}}{\partial \dot{V}_1} & \frac{\partial C_{1,1}}{\partial \dot{V}_2} & \cdots & \frac{\partial C_{1,1}}{\partial \dot{V}_L} \\ \frac{\partial C_{1,2}}{\partial \dot{V}_1} & \frac{\partial C_{1,2}}{\partial \dot{V}_2} & \cdots & \frac{\partial C_{1,2}}{\partial \dot{V}_L} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial C_{1,P}}{\partial \dot{V}_1} & \frac{\partial C_{1,P}}{\partial \dot{V}_2} & \cdots & \frac{\partial C_{1,P}}{\partial \dot{V}_L} \\ \frac{\partial C_{2,1}}{\partial \dot{V}_1} & \frac{\partial C_{2,1}}{\partial \dot{V}_2} & \cdots & \frac{\partial C_{2,1}}{\partial \dot{V}_L} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial C_{N,P}}{\partial \dot{V}_1} & \frac{\partial C_{N,P}}{\partial \dot{V}_2} & \cdots & \frac{\partial C_{N,P}}{\partial \dot{V}_L} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Elementy macierzy wrażliwości oblicza się z zależności 4.10 przybliżając pochodne cząstkowe za pomocą różnic centralnych.

$$\frac{\Delta C_{i,j}}{\Delta \dot{V}_k} = \frac{C_{i,j}(\dot{V}_1 \dots \dot{V}_k(1+\epsilon) \dots \dot{V}_L) - (C_{i,j}(\dot{V}_1 \dots \dot{V}_k(1-\epsilon) \dots \dot{V}_L))}{2\dot{V}_k\epsilon} \quad (4.10)$$

gdzie: $\epsilon = 0,001$ i określa poprawkę do strumieni powietrza przyjętą przy liczeniu macierzy wrażliwości.

Podstawiając macierz wrażliwości 4.9 do równania 4.8 otrzymujemy zależność:

$$-\mathbf{J}^T(\dot{\mathbf{V}})(\mathbf{C}^* - \mathbf{C}) = 0 \quad (4.11)$$

Rozwiązanie równania 4.11 dla zadania nieliniowego wymaga zastosowania procedury iteracyjnej, którą otrzymuje się przez linearyzację wektora stężeń estymowanych $\mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}})$ w szereg Taylora dla aktualnych strumieni wokół k-tej iteracji:

$$\mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}}) = \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}}^k) + \mathbf{J}^k(\dot{\mathbf{V}}^{k+1} - \dot{\mathbf{V}}^k) \quad (4.12)$$

Podstawiając równanie 4.11 do 4.12 i odpowiednio przekształcając otrzymujemy iteracyjną procedurę do wyznaczenia wektora estymowanych strumieni $\dot{\mathbf{V}}$:

$$\dot{\mathbf{V}}^{k+1} = \dot{\mathbf{V}}^k + [(\mathbf{J}^k)^T \mathbf{J}^k]^{-1} [\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}}^k)] \quad (4.13)$$

Nieliniowe zadanie estymacji parametrów modelu matematycznego należy do grupy zadań źle uwarunkowanych. Dlatego procedura Levenberga-Marquardta wprowadza do równania 4.13 dodatkowy człon regularyzacyjny w postaci:

$$\dot{\mathbf{V}}^{k+1} = \dot{\mathbf{V}}^k + [(\mathbf{J}^k)^T \mathbf{J}^k + \mu^k \mathbf{\Omega}^k]^{-1} [\mathbf{C}^* - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{V}}^k)] \quad (4.14)$$

gdzie: μ^k jest parametrem regularyzacyjnym a $\mathbf{\Omega}^k$ jest macierzą jednostkową.

Celem członu $\mu^k \mathbf{\Omega}^k$ jest wy tłumienie oscylacji i niestabilności rozwiązania wynikających ze złego uwarunkowania macierzy estymowanych strumieni powietrza. Parametr regularyzacyjny

μ^k przyjmuje dużą wartość na początku iteracji gdy zadanie dla początkowych wartości jest źle uwarunkowane i jest stopniowo zmniejszany.

Jako kryterium zakończenia procedury przyjęto warunek:

$$\left(\dot{V}^{k+1} - \dot{V}^k\right)^2 < \epsilon \quad (4.15)$$

4.3 Empiryczna weryfikacja opracowanego modelu

Z uwagi na dostępne wyniki przeprowadzonych pomiarów empiryczną weryfikację opracowanego modelu przeprowadzono dla modelu jednostrefowego. Obejmowała ona obliczenia liczby wymian powietrza w pokoju w oparciu o zarejestrowane czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla i porównanie ich z liczbą wymian powietrza uzyskana na podstawie pomiaru prędkości powietrza w szczelinie pod drzwiami. Obliczenia przeprowadzono dla pokoju 1 w mieszkaniu II (rysunek 3.3). Pomiary przeprowadzone w pokoju opisano w rozdziale 3 w punkcie 3.2.1.

W tabelicy 4.1 przedstawiono porównanie liczby wymian powietrza obliczonej w oparciu o opracowany model z liczbą wymian uzyskaną z pomiaru prędkości w szczelinie dla trzech kolejnych dni. Największe różnice wyznaczonej liczby wymian powietrza z pomiaru stężenia CO₂ w odniesieniu do liczby wymian wyznaczonej z pomiaru prędkości uzyskano dla czujników 1 i 2 (umieszczonych pod sufitem i w rogu pokoju rysunek 3.3). Najmniejsze różnice wystąpiły dla czujnika 4 (umieszczonego na wysokości 0,45 cm w niewielkiej odległości od środka pokoju). Szacowana niepewność względna obliczeń liczby wymian powietrza na podstawie pomiaru prędkości w szczelinie pod drzwiami wyniosła średnio 13%.

Tablica 4.1: Porównanie liczby wymian powietrza obliczonej w oparciu o pomiar prędkości powietrza anemometrem oraz stężenia CO₂ w analizowanym pokoju dla trzech dni pomiarów

Data pomiaru	Czas pomiaru	Liczba wymian powietrza n , h^{-1} wyznaczona w oparciu o pomiar:						Średnia
		Anemometrem		Czujnikiem				
		wynik obl.	niepewność obl.	1	2	3	4	
5.05	3:16-6:25	0,81	(± 0,11)	0,89	1,04	0,98	0,81	0,89
6.05	3:18-6:25	1,02	(± 0,13)	0,90	1,14	1,10	1,02	1,03
7.05	3:35-6:43	0,45	(± 0,06)	0,33	0,41	0,43	0,41	0,39

Ważnym elementem wpływającym na dokładność obliczeń liczby wymian powietrza jest błąd pomiaru stężenia ditlenku węgla. Analizowano wpływ błędów systematycznych oraz błędów losowych pomiaru CO₂ na wyniki obliczeń liczby wymian powietrza. Błędy systematyczne generowano wprowadzając do czasowych przebiegów stężenia stałą wartość błędu. Błędy losowe wygenerowano za pomocą generatora liczb pseudolosowych przyjmując rozkład

normalny z odchyleniem standardowym równym przyjętej wielkości błędu. Przyjęto trzy zakresy zmienności stężenia CO₂ dla generowanych błędów:

- **Przedział I**, $\pm 10\%$ wartości średniego stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Przedział ten określają normy [42, 43] jako dopuszczalny dla wahań stężenia gazu znacznikowego w obrębie jednej strefy,
- **Przedział II**, \pm dokładność pomiarowa czujników ditlenku węgla. Dokładność pomiarowa czujników CO₂ wykorzystywanych w pomiarach wynosiła 20 ppm \pm 3% wskazania,
- **Przedział III**, ± 20 ppm, minimalna wartość oszacowania błędu pomiarowego.

Błędy systematyczne pomiaru stężenia CO₂ wprowadzają średnio błąd wyznaczenia liczby wymian powietrza na poziomie 26% dla przedziału I, 12% dla przedziału II oraz rzędu 4% dla przedziału III (tablica 4.2).

Tablica 4.2: Analiza wpływu błędów systematycznych pomiaru stężenia CO₂ na obliczoną liczbę wymian powietrza

Data pomiaru	Pomiar Anemometrem	Wahania stężenia CO ₂ dla pomiarów czujnikiem					
		-10%	+10%	- błąd czuj.	+ błąd czuj.	-20 ppm	+20 ppm
		Obliczona liczba wymian powietrza n , h ⁻¹					
5.05	0,81	1,05	0,64	0,92	0,73	0,85	0,78
6.05	1,02	1,31	0,81	1,15	0,91	1,07	0,97
7.05	0,45	0,60	0,34	0,51	0,40	0,47	0,44

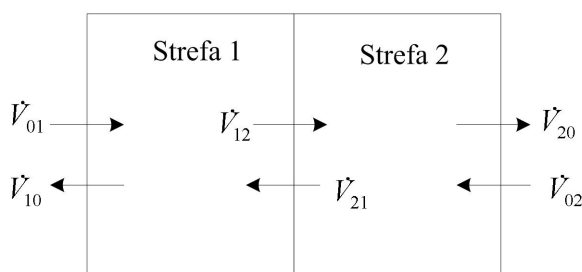
Wyniki analizy wpływu błędów losowych pomiaru stężenia CO₂ na obliczoną liczbę wymian powietrza przedstawiono w tablicy 4.3. Zaobserwowano, że wpływ błędów losowych na wyznaczoną liczbę wymian jest dużo mniejszy niż dla błędów systematycznych. Dla przedziału I tolerancji zmian stężenia CO₂ średni błąd wynosi 9%, dla przedziału II 7% natomiast dla przedziału III przyjmuje wartość 3%.

Tablica 4.3: Analiza wpływu błędów losowych pomiaru stężenia CO₂ na obliczoną liczbę wymian powietrza

Data pomiaru	Pomiar Anemometrem	Wahania stężenia CO ₂ dla pomiarów czujnikiem		
		$\pm 10\%$	\pm błąd czujnika	± 20 ppm
		Obliczona liczba wymian powietrza n , h ⁻¹		
5.05	0,81	0,77	0,83	0,81
6.05	1,02	1,12	1,07	1,05
7.05	0,45	0,40	0,51	0,43

4.4 Ocena dokładności rozwiązania zadania odwrotnego

Dla oceny dokładności rozwiązania zadania odwrotnego (punkt 4.2) przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla modelu międzystrefowego. Obliczenia przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie dla zadanych międzystrefowych strumieni powietrza wyznaczono czasowe przebiegi krzywych stężenia CO_2 w strefach w oparciu o analityczne rozwiązanie układu równań 4.1. W drugim etapie jako wielkości zadane przyjmowano obliczone czasowe przebiegi stężenia CO_2 i w opracowanym programie komputerowym wyznaczano międzystrefowe strumienie powietrza. Obliczenia przeprowadzono dla modelu dwustrefowego. Założono dwukierunkowe strumienie powietrza przepływającego pomiędzy strefami (rysunek 4.2). Obliczenia przeprowadzono dla różnej emisji ditlenku węgla w każdej ze stref. Kryterium oceny dokładności rozwiązania numerycznego była niezgodność pomiędzy wstępnie zadanymi i obliczonymi wartościami strumieni powietrza.



Rysunek 4.2: Schemat przepływów powietrza w modelu dwustrefowym

Uzyskano bardzo dobrą zgodność obliczonych strumieni powietrza przepływających przez dwie strefy z wartościami wstępnie założonymi. Przykładowe wyniki obliczonych i założonych strumieni powietrza przedstawiono w tabeli 4.4. Wartości funkcji celu opisanej zależnością 4.4 dla analizowanych przypadków są mniejsze od $10\text{E}-13$.

Dla większej liczby stref wyniki obliczeń dwukierunkowych przepływów powietrza są obciążone dużym błędem ze względu na pogorszenie uwarunkowania zadania odwrotnego. Jest to naturalna konsekwencja istotnego zwiększania liczby nieznanych strumieni, które są odtwarzane za pomocą tej metody. W takim przypadku może istnieć więcej niż jedno rozwiązanie. Dlatego dla modeli powyżej dwóch stref analizowano jednokierunkowe przepływy powietrza pomiędzy strefami. Analiza jednokierunkowych przepływów powietrza dla układu trój i czterostrefowego dała dobrą zgodność wstępnie założonych i obliczonych strumieni powietrza międzystrefowego. Dla wszystkich analizowanych przypadków wartość funkcji celu 4.4 była mniejsza od $10\text{E}-19$. Dla większej liczby stref zaobserwowano problemy z odpowiednim doбором startowych wartości strumieni powietrza. W niektórych przypadkach program nie był w stanie znaleźć zbieżnego rozwiązania dla założonych wartości startowych strumieni powietrza.

Przeprowadzono również analizę wrażliwości rozwiązania zadania odwrotnego na zmiany emisji ditlenku węgla wynikające ze zmiany aktywności metabolicznej człowieka [86, 87]. Zmiana aktywności metabolicznej o 1 met generuje zmianę strumienia CO_2 emitowanego przez

Tablica 4.4: Obliczone strumienie objętości powietrza dla modelu dwustrefowego

Strefa	Emisja CO ₂ , m ³ /h									
	1		2		3		4		5	
1	2.18E-02	0.00E+00	2.18E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.52E-02	
2	2.24E-02	2.93E-02	1.31E-02	0.00E+00	1.16E-02					
Strumienie powietrza, m ³ /h										
	zał.	oblicz.	zał.	oblicz.	zał.	oblicz.	zał.	oblicz.	zał.	oblicz.
\dot{V}_{01}	30,00	30,00	50,00	50,00	10,00	10,00	30,00	30,00	12,00	12,00
\dot{V}_{02}	5,00	5,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00
\dot{V}_{10}	15,00	15,00	6,00	6,00	2,00	2,00	5,00	5,00	0,00	0,00
\dot{V}_{20}	20,00	20,00	46,00	46,00	8,00	8,00	27,00	27,00	14,00	14,00
\dot{V}_{12}	35,00	35,00	47,00	47,00	9,00	9,00	25,00	25,00	12,00	12,00
\dot{V}_{21}	20,00	20,00	3,00	3,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wartość funkcji celu										
$S(\dot{V})$	4.35E-21	5.06E-17	8.41E-14	9.29E-25	1.34E-21					

człowieka o 13%. Wyniki obliczeń dla układu jednostrefowego pokazały istotny wpływ zmiany emisji CO₂ na wartość obliczonego strumienia powietrza. Zmiana aktywności metabolicznej o 1 met wprowadza niezgodność wartości obliczonego strumienia powietrza rzędu 30% dla małej liczby wymian powietrza $n = 0,25 \text{ h}^{-1}$. Niezgodność ta maleje ze wzrostem liczby wymian powietrza do 17% dla $n = 1 \text{ h}^{-1}$.

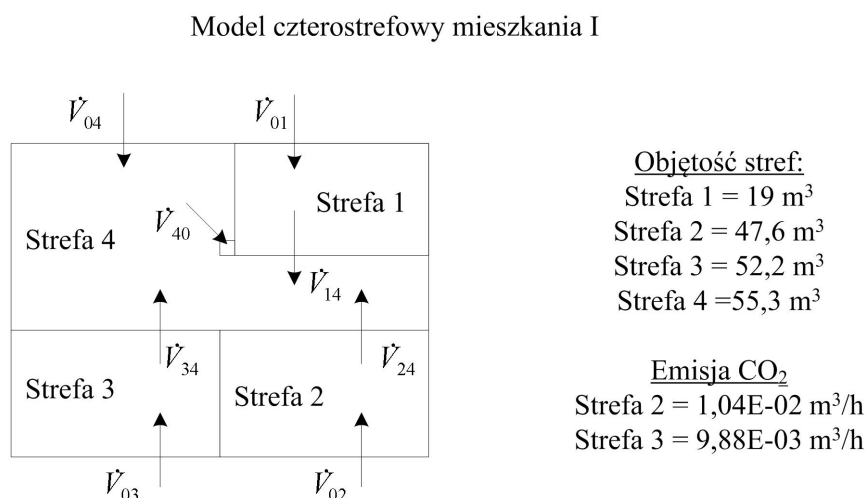
4.5 Ocena intensywności wentylacji w analizowanych budynkach mieszkalnych

W oparciu o przedstawiony model matematyczny i opracowany program komputerowy przeprowadzono obliczenia numeryczne dla oceny intensywności wentylacji w dwóch budynkach mieszkalnych: w mieszkaniu w budynku jednorodzinym i w mieszkaniu w budynku wielorodzinnym (rozdział 3).

4.5.1 Ocena intensywności wentylacji w mieszkaniu I w budynku jednorodzinym

Obliczenia międzystrefowych strumieni powietrza w mieszkaniu w budynku jednorodzinym (rysunek 3.4) wykonano wykorzystując wyniki pomiaru czasowych przebiegów stężenia CO₂ w każdej strefie. Pomiaru te zostały omówione w rozdziale 3 w punkcie 3.2.2. Układ stref i przyjęte do obliczeń kierunki strumieni powietrza przepływające przez mieszkanie przedstawiono na rysunku 4.3. Założono, że powietrze napływa do pomieszczeń z zewnątrz natomiast usuwane jest na zewnątrz przez kratkę wentylacyjną w strefie 4. Źródłem ditlenku węgla w

mieszkańcu były dwie osoby. W nocy jedna osoba spała w strefie 2 a druga w strefie 3.



Rysunek 4.3: Układ stref i założone kierunki przepływu powietrza w mieszkaniu I

Obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza przeprowadzono dla 17 monotonicznych przebiegów czasowych stężenia CO₂ wyodrębnionych dla kolejnych dni pomiarów. W tabelicy 4.5 przedstawiono przykładowe wartości obliczonych strumieni powietrza przepływającego pomiędzy analizowanymi strefami. Do pomieszczeń sypialni 2 i 3 powietrze napływa z zewnątrz a następnie przepływa do strefy 4. Wartości strumieni powietrza przepływającego przez sypialnie 2 i 3 (rysunek 4.3) są bardzo małe. Odpowiadająca tym strumieniom liczba wymian powietrza nie przekracza 0,25 h⁻¹ dla strefy 2 i 0,5 h⁻¹ dla strefy 3. Dla strefy 1 (łazienka) uzyskano strumień powietrza rzędu 2-3 m³/h przy całkowicie zamkniętym oknie. Przy lekko uchylonym oknie zmienia się kierunek i ilość powietrza przepływającego przez łazienkę. Powietrze napływa wówczas do łazienki (strefa 1) ze strefy 4 i jest z niej usuwane za zewnątrz przez szczelinę w oknie. Ujemne wartości strumieni powietrza przepływającego przez łazienkę oznaczają, że kierunek przepływu powietrza jest przeciwny do założonego. Jest to zaletą opracowanej metody, która pozwala na prostą detekcję kierunków przepływu powietrza w budynku. Strefa czwarta jest strefą zbiorczą do której powietrze napływa głównie z pozostałych stref o podwyższonym stężeniu CO₂. Powietrze to następnie usuwane jest ze strefy 4 na zewnątrz przez kratkę wentylacyjną lub częściowo przez strefę 1.

Strumień powietrza usuwany z analizowanego mieszkania powinien według normy [74] wynosić 100 m³/h. Obliczone wartości strumieni powietrza usuwanego z mieszkania są mniejsze i zmieniają się od 26 do 77 m³/h w zależności od dnia pomiaru. Wynika z tego, że badane mieszkanie było słabo wentylowane a obliczone wartości strumienie powietrza nie spełniają kryterium minimalnej ilości świeżego powietrza, którą należy doprowadzić do pomieszczeń z wentylacją naturalną według [74]. Słabą wentylację pomieszczeń potwierdzają wysokie stężenia CO₂ (rysunek 3.12) zarejestrowane w godzinach porannych.

Strumień powietrza obliczone w modelu międzystrefowych przepływów powietrza w stre-

fach od 1 do 3 porównano z wartościami strumieni powietrza obliczonymi dla układu pojedynczych stref. W obu przypadkach uzyskano jednakowe wartości strumieni powietrza. Jedynie strefa czwarta ze względu na liczbę dopływających strumieni nie może być liczona jako układ jednostrefowy. Dla obliczanych strumieni powietrza uzyskano bardzo dobre dopasowanie obliczeniowych krzywych stężenia CO₂ do krzywych pomiarowych (rysunek 4.4) z wartością funkcji celu 4.4 mniejsza od 5E-7 dla wszystkich analizowanych przypadków.

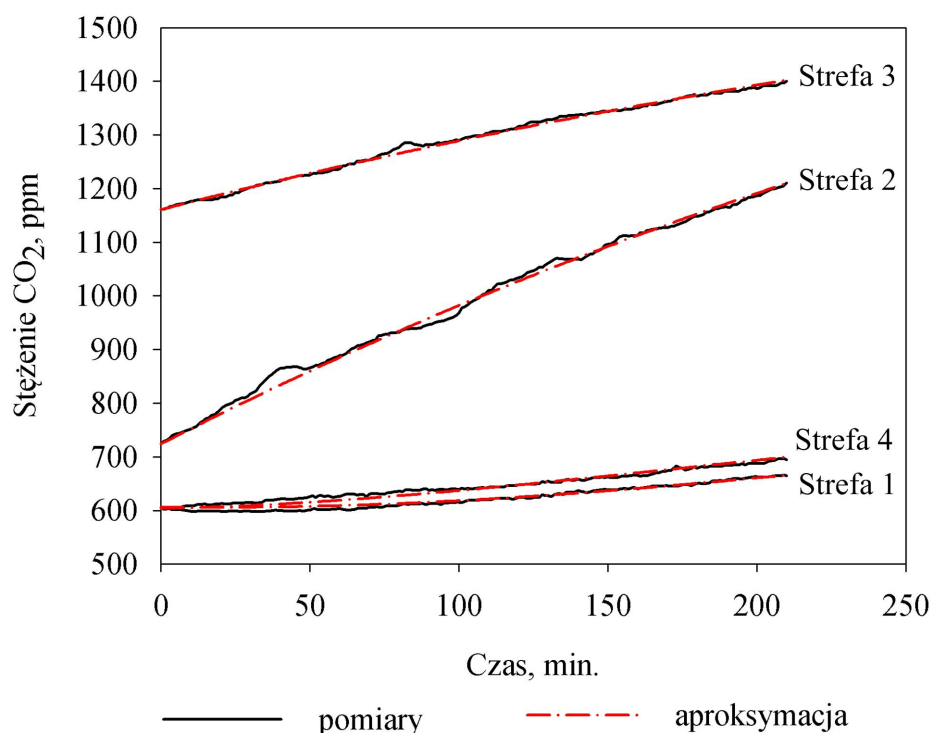
Tablica 4.5: Obliczone strumienie objętości powietrza przepływającego przez mieszkanie I

Czas pomiarów							
Data	31.03	31.03	01.04	02.04	03.04	03.04	04.04
Godziny	08:00- 15:00	02:00- 06:00	02:00- 08:00	02:00- 07:00	09:00- 16:00	02:00- 05:30	09:30- 16:00
Strumienie powietrza, m ³ /h							
\dot{V}_{01}	2,21	-26,04	0,23	-27,58	2,63	-17,81	2,64
\dot{V}_{02}	4,21	11,85	5,77	6,33	4,80	6,00	5,26
\dot{V}_{03}	4,93	15,82	26,46	8,30	6,81	6,68	5,93
\dot{V}_{04}	6,25	-1,62	44,97	14,65	10,46	16,54	7,24
\dot{V}_{14}	2,21	-26,04	0,23	-27,58	2,63	-17,81	2,64
\dot{V}_{24}	4,21	11,85	5,77	6,33	4,80	6,00	5,26
\dot{V}_{34}	4,93	15,82	26,46	8,30	6,81	6,68	5,93
\dot{V}_{40}	17,59	0,01	77,44	1,70	24,69	11,41	21,08
Wartość funkcji celu							
$S(\dot{V})$	1,23E-07	4,93E-07	8,75E-08	2,36E-07	2,46E-07	3,21E-08	1,46E-07

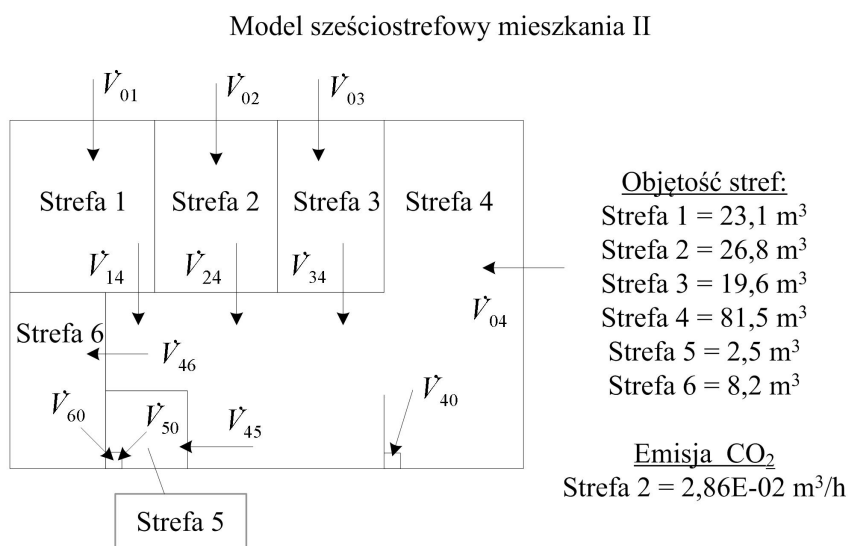
4.5.2 Ocena intensywności wentylacji w mieszkaniu II w budynku wielorodzinnym

Międzystrefowe przepływy powietrza w mieszkaniu II w budynku wielorodzinnym (rysunek 3.5) obliczono na podstawie zarejestrowanych czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla. Pomiary te omówiono w rozdziale 3 w punkcie 3.2.2. W mieszkaniu założono, że powietrze napływa do stref 1 ÷ 4 z zewnątrz i jest na zewnątrz usuwane przez kratki wentylacyjne w strefie 4 (kuchnia), 5 (WC) i 6 (łazienka). Układ stref i przyjęte kierunki przepływu powietrza przedstawiono na rysunku 4.5. Źródłem ditlenku węgla w mieszkaniu II były trzy osoby: dwie dorosłe i roczne dziecko. W nocy wszystkie osoby spały w sypialni (strefa 2).

Obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza przeprowadzono dla 11 monotonicznych przebiegów czasowych stężenia CO₂ wyodrębnionych dla kolejnych dni pomiarów. W tablicy 4.6 przedstawiono obliczone wartości strumieni powietrza dla kilku wybranych dni pomiarów. Obliczone wartości międzystrefowych strumieni powietrza w strefach od 1 do 3 (pokoje) świadczą o niedostatecznej wentylacji tych pomieszczeń. Odpowiadająca im liczba



Rysunek 4.4: Dopasowanie obliczeniowych czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla do krzywych pomiarowych dla pomiarów w nocy w dniu 3 kwietnia



Rysunek 4.5: Układ stref i założone kierunki przepływu powietrza w mieszkaniu II

wymian powietrza nie przekracza $0,3 \text{ h}^{-1}$ dla stref 1 i 3 oraz $0,6 \text{ h}^{-1}$ dla strefy 2. W pomieszczeniach tych uzyskano założone kierunki przepływu powietrza z zewnątrz do każdej ze stref. Ilość powietrza przepływającego przez sypialnię nie jest w stanie zapewnić właściwej jakości

powietrza wewnętrznego przy trzech śpiących w niej osobach. Dla pozostałych pokoi w których nie przebywali ludzie liczba wymian powietrza jest nieznacznie mniejsza od $0,5 \text{ h}^{-1}$. Powietrze ze stref od 1 do 3 przepływa następnie do strefy 4, która łączy się z wszystkimi pozostałymi strefami. Powietrze z mieszkania usuwane jest głównie przez kratkę wentylacyjną w łazience. Strumień powietrza wypływający przez kratkę w kuchni (strefa 4) jest znikomy, natomiast w strefie 5 (WC) powietrze jest zasysane do pomieszczenia przez kratkę wentylacyjną. Kierunki przepływu powietrza w strefach 4 i 5 potwierdzają również obserwacje mieszkańców. Zасыsanie powietrza przez kratki wentylacyjne w kuchni i w WC występuje najczęściej w sezonie grzewczym. Sumaryczna ilość powietrza usuwana z badanego mieszkania powinna według normy [74] wynosić $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Maksymalny strumień powietrza usuwany z mieszkania nie przekracza $72 \text{ m}^3/\text{h}$.

Strumienie powietrza w mieszkaniu II obliczone zaproponowaną metodą porównano z wartościami obliczonymi modelem jednostrefowym. Uzyskano zbliżone wartości w strefach 1, 2, 3 i 5. Znaczące różnice wystąpiły jedynie w strefie 6. Różnice te objawiają się słabym dopasowaniem krzywej obliczeniowej stężenia CO_2 w strefie 6 do krzywej pomiarowej (rysunek 4.6). Słabe dopasowania krzywej obliczeniowej stężenia CO_2 w strefie 6 do krzywej pomiarowej uzyskano również w strefie 4 dla pozostałych stref uzyskano bardzo dobrą zgodność. Trudność w uzyskaniu zbieżnego rozwiązania dla tych dwóch stref wynika z charakteru przebiegu krzywych stężenia ditlenku węgla w mieszkaniu w którym emisja ditlenku węgla występowała tylko w strefie 2. W pozostałych strefach stężenie ditlenku węgla zanika, a krzywe stężenia są do siebie prawie równoległe (rysunek 4.6) i mieszczą się w granicach tolerancji urządzeń pomiarowych. Powoduje to, że analizowane zadanie odwrotne jest źle uwarunkowane, a wartości obliczonych strumieni powietrza są obarczone znacznymi błędami. Dlatego wartość obliczonych strumieni powietrza w strefie 4 i 6 mogą być traktowane jedynie jako wartości szacunkowe obciążone dużym błędem.

4.6 Wnioski do rozdziału

Na potrzeby obliczeń międzystrefowych przepływów powietrza oraz oceny intensywności wentylacji w oparciu o pomiar stężenia ditlenku węgla opracowano model matematyczny i program komputerowy. Danymi do obliczeń są:

- czasowe przebiegi stężenia ditlenku węgla w strefach,
- emisja ditlenku węgla od ludzi przebywających w pomieszczeniach,
- oraz objętość stref.

Niezbędnym elementem do obliczeń w programie jest również znajomość emisji ditlenku węgla od ludzi przebywających w badanych strefach oraz znajomość objętości stref pomiarowych. W opracowanym programie przeprowadzono obliczenia liczby wymian powietrza dla

Tablica 4.6: Obliczone strumienie objętości powietrza przepływającego przez mieszkanie II

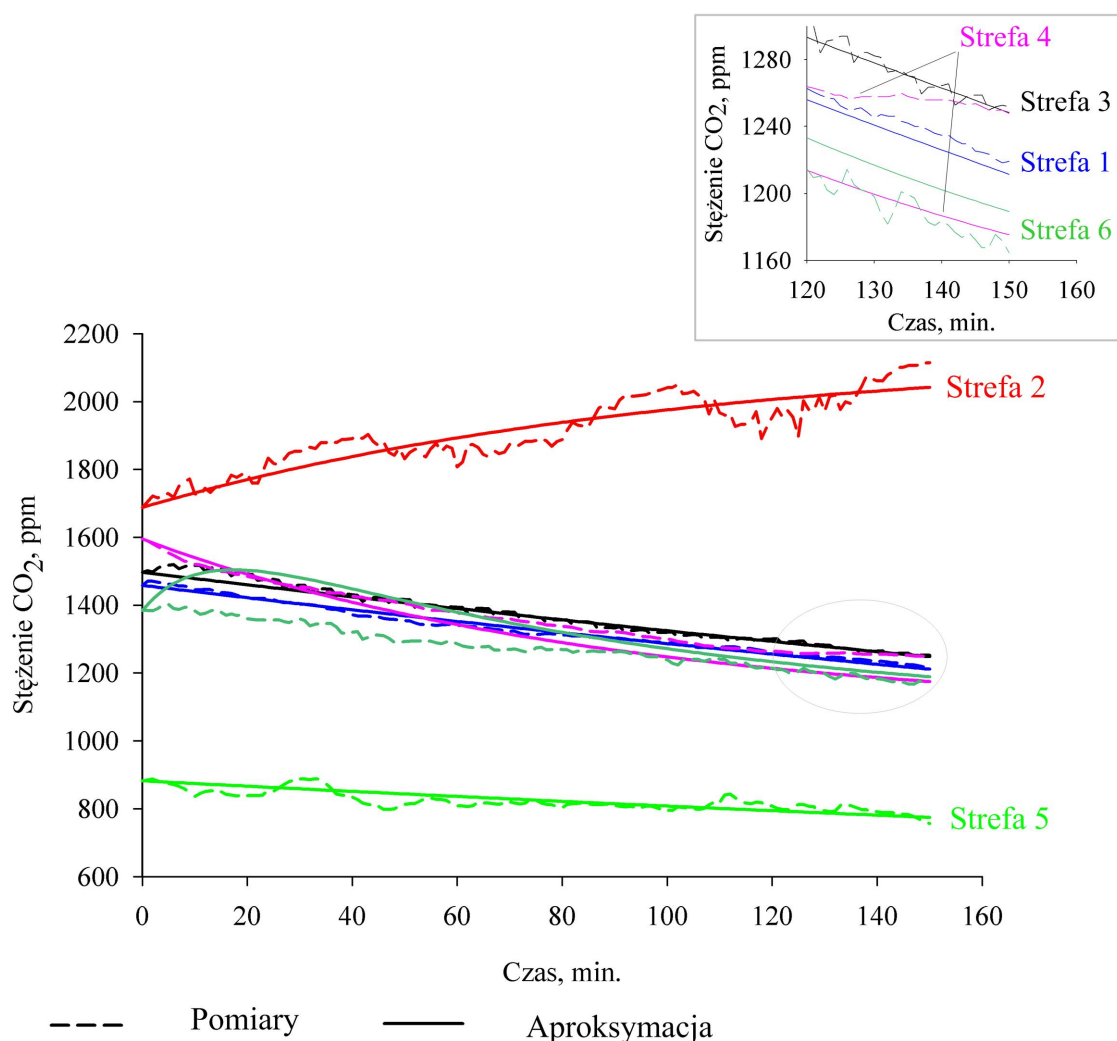
Czas pomiarów							
Data	2.03	3.03	6.03	8.03	9.04	14.04	15.04
Godziny	14:30	03:50	01:40	00:30	03:00	02:00	00:00
	16:00	05:00	04:40	03:00	05:00	05:10	03:50
Strumienie powietrza, m ³ /h							
\dot{V}_{01}	7,21	2,40	1.12	2,33	3,59	4,62	1,13
\dot{V}_{02}	7,76	12,86	1.40	15,95	5,85	11,01	15,19
\dot{V}_{03}	5,28	3,35	1.21	1,92	3,81	4,80	1,17
\dot{V}_{04}	22,90	35,89	4.31	23,32	36,46	50,71	16,63
\dot{V}_{14}	7,21	2,40	1.12	2,33	3,59	4,62	1,13
\dot{V}_{24}	7,76	12,86	1.40	15,95	5,85	11,01	15,19
\dot{V}_{34}	5,28	3,35	1.21	1,92	3,81	4,80	1,17
\dot{V}_{45}	-0,66	-0,34	-0.12	-0,23	-0,68	-0,54	-0,14
\dot{V}_{46}	43,92	54,84	8.70	43,76	50,39	71,68	34,36
\dot{V}_{40}	-0,12	0,00	-0.54	-0,03	0,00	0,00	-0,11
\dot{V}_{50}	-0,66	-0,34	-0.12	-0,23	-0,68	-0,54	-0,14
\dot{V}_{60}	43,92	54,84	8.70	43,76	50,39	71,68	34,36
Wartość funkcji celu							
$S(\dot{V})$	5,95E-07	1,30E-07	2,91E-07	1,67E-06	9,63E-07	2,54E-06	1,56E-06

układu z jedną strefą oraz obliczenia międzystrefowych przepływów dla układów z większą liczbą stref.

Obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza w opracowanym programie wykazały jego pełną przydatność do oceny intensywności wymiany powietrza w mieszkaniach w czasie ich normalnej eksploatacji. Opracowany program komputerowy pozwala na ilościowe określenie strumieni powietrza wymienianego pomiędzy strefami. Jest również źródłem informacji o kierunkach przepływu powietrza w mieszkaniu. Ma to szczególne znaczenie dla poznania dróg przepływu zanieczyszczonego powietrza w mieszkaniu i dla oceny jakości powietrza w każdej ze stref.

Weryfikacja empiryczna modelu potwierdziła dobrą dokładność uzyskanych wyników obliczeń. Rozbieżności mieszczą się w granicach niepewności wyznaczenia liczby wymian powietrza z pomiaru anemometrem. Usytuowanie czujników ditlenku węgla ma istotny wpływ na wielkość obliczonej liczby wymian powietrza. Istnieje zatem potrzeba optymalizacji rozmieszczenia czujników CO₂ z uwagi na dokładność obliczeń liczby wymian powietrza dla analizowanych pomieszczeń.

Przyjęcie dwukierunkowych strumieni powietrza dało dobre wyniki obliczeń w modelu dwustrefowym. Dla większej liczby stref obliczenia są trudne ze względu na źle uwarunkowane zadanie odwrotne. Dlatego dla liczby stref powyżej dwóch analizowano wyłącznie jedno-



Rysunek 4.6: Dopasowanie obliczeniowych czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla do krzywych pomiarowych dla pomiarów w nocy z dnia 8 marca

kierunkowe przepływy powietrza pomiędzy strefami. Zaobserwowano również, że równoległe przebiegi krzywych stężenia ditlenku węgla dla układów wielostrefowych powodują złe uwarunkowanie zadania odwrotnego i brak jednego rozwiązania. W tym przypadku możliwe jest zastąpienie stref z małą różnicą stężeń (w granicach błędu czujnika ditlenku węgla) przez jedną strefę lub liczenie każdej ze stref osobno w modelu jednostrefowym.

Ocenę intensywności wentylacji na podstawie opracowanego modelu i programu komputerowego przeprowadzono dla dwóch mieszkań. Wyznaczone wartości strumieni powietrza w pokojach dla obydwu mieszkań świadczą o niewystarczającej wentylacji tych pomieszczeń i słabej jakości powietrza wewnętrznego. Problem ten szczególnie nasila się w godzinach nocnych, kiedy drzwi do sypialni są zamknięte. Powoduje to przy bardzo małej liczbie wymian powietrza bardzo szybkie narastanie stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach. Sumaryczny strumień powietrza usuwany z każdego mieszkania jest zbyt mały w stosunku do wymagań normy [74] dla budynków z wentylacją naturalną. Dla obydwu mieszkań określono, że powie-

trze napływa do sypialni z zewnątrz, a następnie przepływa do kolejnej strefy w mieszkaniu. Założone drogi wypływu powietrza z mieszkania nie zawsze są w pełni skuteczne. W budynku wielorodzinnym obliczone strumienie powietrza świadczą o tym, że powietrze często jest zasysane do mieszkania przez kratki wywiewne.

Dla układów wielostrefowych w czasie obliczeń w opracowanym programie zaobserwowano problem z przyjmowaniem wartości startowych strumieni powietrza. Nie dla wszystkich przyjmowanych wartości startowych strumieni powietrza dla układu sześciostrefowego w mieszkaniu II program był w stanie znaleźć zbieżne rozwiązanie. Dlatego w dalszej pracy planowane jest zastosowanie algorytmu do przeszukiwania przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań dla strumieni powietrza w celu określenia właściwego punktu startowego do obliczeń.

Rozdział 5

Analiza numeryczna rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu

Modelowanie CFD rozprzestrzeniania się wydychanego przez ludzi ditlenku węgla znajduje najczęściej zastosowanie do oceny jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach [88, 89, 71, 69, 90]. Analiza przestrzennego rozkładu metabolicznego CO₂ dla potrzeb reprezentatywnego rozmieszczenia czujników w czasie pomiarów do tej pory była realizowana jedynie na podstawie badań eksperymentalnych [66, 46, 67, 68]. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują na duże różnice w stężeniu ditlenku węgla w pomieszczeniu w którym przebywają ludzie. Pozwalają one na określenie pojedynczych miejsc pomiaru stężenia ditlenku węgla a nie możliwych obszarów pomiarowych. Wyniki modelowania numerycznego CFD pozwalają natomiast na ilościową i jakościową ocenę procesu transportu wydychanego przez ludzi ditlenku węgla w pomieszczeniu dając jednocześnie obraz zjawiska rozprzestrzeniania się CO₂ często nieuchwytnego w czasie pomiarów.

5.1 Numeryczne modelowanie przepływów powietrza w pomieszczeniach

Metody numeryczne CFD pozwalają na obliczenia przepływów powietrza, wymiany ciepła i transportu zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach. Zjawiska przepływu powietrza opisują równania bilansowe będące matematycznym zapisem praw zachowania masy, pędu i energii. W skład układu równań wchodzi także równania zamykające do których należą: równania konstytutywne opisujące związki pomiędzy stanem naprężeń i odkształceń ośrodka, równania termodynamiczne stanu oraz równania opisujące procesy transportu ciepła (prawo Fouriera) i dyfuzji (prawo Ficka) [20, 34]. Uogólnione równanie zachowania dowolnej wielkości ϕ zapisane dla obszaru kontrolnego V ma postać:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \oint_V S_\phi dV \quad (5.1)$$

gdzie: ρ jest gęstością płynu \mathbf{u} jest wektorem prędkości płynu a zmienna t oznacza czas.

Lewa strona równania przedstawia zmienny w czasie człon akumulacyjny i człon adwekcyjny, natomiast prawa strona równania zawiera człon dyfuzyjny oraz człon źródłowy. Jeżeli ϕ w równaniu 5.1 jest równe 1 wówczas równanie to nazywamy równaniem ciągłości (zachowania masy), dla $\phi = \bar{u}$ nazywamy równaniem zachowania pędu, dla $\phi = T$ równaniem energii oraz dla $\phi = Y_i$ równaniem transportu i -tego składnika mieszaniny.

Jednoznaczne rozwiązanie danego układu równań różniczkowych wymaga określenia warunków jednoznaczności zadania do których należą: kształt geometryczny obszaru w którym rozwiązujemy równanie, warunki brzegowe, warunki początkowe oraz właściwości fizyczne ciał biorących udział w procesie [39, 91].

Przedmiotem pracy jest modelowanie przepływów powietrza w pokoju z wentylacją naturalną. Obliczenia wykonano dla dwu- i trójwymiarowej geometrii pomieszczenia za śpiącym na łóżku człowiekiem. Rozpatrywano zarówno ustalony jak i nieustalony przepływ powietrza. Powietrze wewnątrz modelowanego pomieszczenia traktowano jako gaz doskonały, niutonowski, nieściśliwy i nieizotermiczny składający się z czterech składników: azotu, tlenu, ditlenku węgla i pary wodnej.

Założono ponadto, że decydującym mechanizmem transportu ciepła jest konwekcja. Promieniowanie zostało pominięte ze względu na niskie wartości bezwzględne temperatur jak również niewielkie ich różnice. Uwzględnienie promieniowania w obliczeniach numerycznych znacząco wydłużyłoby czas obliczeń. Jak pokazują wyniki badań opisanych przez Deevy'a i Gobeau promieniowanie ma duży wpływ na wyniki obliczeń numerycznych dla wentylacji wyporowej [92], natomiast w znacznie mniejszym stopniu wpływa na wyniki obliczeń dla wentylacji naturalnej (mieszającej). Opracowany model matematyczny rozprzestrzeniania się CO_2 w pomieszczeniu obejmuje:

- równania zachowania masy, energii i pędu,
- równanie transportu składników powietrza,
- równania modelu turbulencji,
- model oddychającego człowieka.

5.1.1 Równania zachowania

Model matematyczny składa się z podstawowych równań zachowania: masy, pędu, energii oraz równań transportu dla składników powietrza. Zostały one zapisane dla średnich wartości zmiennych zależnych: gęstości, prędkości, temperatury i składu (uśrednionych metodą Reynoldsa). Ten układ równań różniczkowych cząstkowych uzupełniono równaniami modelu turbulencji [34, 36, 93, 94].

Równanie ciągłości

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5.2)$$

gdzie ρ jest gęstością płynu, t jest czasem a \mathbf{u} jest wektorem prędkości.

Równanie zachowania pędu

Równanie zachowania pędu dla płynu niutonowskiego nazywane jest równaniem Naviera-Stokesa:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - \nabla \cdot \tau_t \quad (5.3)$$

gdzie p oznacza ciśnienie, \mathbf{g} jest wektorem przyspieszenia ziemskiego, μ jest dynamicznym współczynnikiem lepkości molekularnej. Ostatni człon po prawej stronie równania jest dywergencją tensora naprężeń turbulentnych τ_t i uwzględnia dodatkowe naprężenia powstające w płynie z powodu fluktuacji wektora prędkości (turbulencji). Tensor ten ma następującą postać:

$$\tau_t = \begin{bmatrix} \overline{\rho u'^2} & \overline{\rho u'v'} & \overline{\rho u'w'} \\ \overline{\rho u'v'} & \overline{\rho v'^2} & \overline{\rho v'w'} \\ \overline{\rho u'w'} & \overline{\rho v'w'} & \overline{\rho w'^2} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

składnikami tego tensora są średnie wartości kowariancji fluktuacji wektora prędkości u' , v' i w' s odpowiednio w kierunkach x , y i z . Ponieważ fluktuacje wektora prędkości nie są znane człon ten wymaga modelowania [34, 95, 96].

Równanie zachowania energii

Równanie zachowania energii ma postać:

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) - \nabla \cdot \left(\sum_i h_i \mathbf{j}_i \right) \quad (5.5)$$

gdzie: e jest energią wewnętrzną właściwą, λ_{eff} jest efektywnym współczynnikiem przewodzenia ciepła, T jest temperaturą płynu, h_i i \mathbf{j}_i oznaczają odpowiednio entalpię właściwą i wektor gęstości strumienia masy i -tego składnika płynu ($i = N_2, O_2, H_2O, CO_2$).

Równania transportu składników powietrza

Dla składników mieszaniny powietrza składającego się z azotu, tlenu, ditlenku węgla i pary wodnej zapisano następujące równania bilansowe:

$$\frac{\partial (\rho Y_{O_2})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_{O_2} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{j}_{O_2} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_{CO_2})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_{CO_2} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{j}_{CO_2} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_{H_2O})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_{H_2O} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{j}_{H_2O} \quad (5.8)$$

Z kolei udział masowy azotu oblicza się z równania na sumę udziałów składników powietrza:

$$Y_{N_2} = 1 - Y_{O_2} - Y_{CO_2} - Y_{H_2O} \quad (5.9)$$

gdzie Y_i jest udziałem masowym i -tego składnika powietrza.

W obliczeniach przyjęto, że powietrze można traktować jako mieszaninę rozrzedzoną, dzięki temu gęstość strumienia masy i -tego składnika \mathbf{j}_i , można wyznaczyć z prawa Fick'a:

$$\mathbf{j}_i = -D_{eff} \nabla Y_i \quad (5.10)$$

gdzie D_{eff} jest efektywnym współczynnikiem dyfuzji.

5.1.2 Równania modelu turbulencji

W przepływie turbulentnym wymiana pędu, masy i ciepła pomiędzy sąsiednimi elementami płynu jest zintensyfikowana z powodu chwilowych i chaotycznych fluktuacji pola prędkości i pozostałych parametrów określających stan płynu. W uśrednionych równaniach zachowania objawia się to w postaci dodatkowych członów, które należy modelować [34, 95, 96].

W niniejszej pracy przyjęto szeroko stosowane założenie, że strumienie te są proporcjonalne do gradientu wielkości której dotyczą [19, 20, 39, 97]. W równaniu zachowania pędu, turbulentny strumień pędu jest reprezentowany przez tensor naprężeń turbulentnych τ_t i przez analogię do prawa Newton'a jego składowe są wyznaczane z zależności:

$$\tau_{t,ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5.11)$$

gdzie: μ_t jest turbulentną lepkością dynamiczną płynu, k energią kinetyczną turbulencji, a δ_{ij} jest deltą Kroneckera. Prędkość fluktuacji $\overline{u'_i u'_j}$ jest w przepływie burzliwym wielkością nieznaną i trudną do wyznaczenia. W tym celu wykorzystywane są modele turbulencji bazujące na różnych hipotezach. W przypadku równania zachowania energii i równań transportu składników powietrza, turbulentny strumień ciepła i masy przez analogię do prawa Fourier'a i Fick'a są wprost proporcjonalne odpowiednio do gradientu temperatury i udziału odpowiedniego składnika powietrza. Współczynnikami proporcjonalności są tzw. turbulentne współczynniki przewodzenia λ_t i dyfuzji D_t . W praktyce oznacza to powiększenie współczynników przewodzenia λ i dyfuzji D w równaniach (5.5) i (5.10) o wartości ich turbulentnych odpowiedników:

$$\begin{aligned} \lambda_{eff} &= \lambda + \lambda_t \\ D_{eff} &= D + D_t \end{aligned} \quad (5.12)$$

Sposób wyznaczania turbulentnych współczynników lepkości, przewodzenia i dyfuzji zależy od przyjętego modelu turbulencji. W zależności od poziomu dokładności wykorzystywane są różne modele lepkości turbulentnej: zerorównaniowe, jedno- i dwurównaniowe oraz model naprężeń Reynoldsa. Modele te wykorzystują uśrednianie czasowe. Do grupy modeli turbulencji

bazujących na uśrednianiu przestrzennym należy natomiast metoda symulacji dużych wirów LES (Large Eddy Simulation) [34, 39]. Dla potrzeb wentylacji najczęściej wykorzystywany jest model turbulencji $k - \epsilon$ [20, 39, 97, 19]. Model $k - \epsilon$ jest półempirycznym, dwurównaniowym modelem opartym na równaniach kinetycznej energii turbulencji k i prędkości dyssypacji energii turbulencji ϵ . W pracy tej wykorzystano dwurównaniowy model RNG $k - \epsilon$. Model ten jest znormalizowanym modelem $k - \epsilon$, w którym do równania transportu ϵ wprowadzona została funkcja losowa opisująca wpływ turbulencji drobnoskalowej [34]. W modelu RNG $k - \epsilon$ rozwiązuje się dwa dodatkowe równania [94]:

- równanie transportu energii kinetycznej turbulencji k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot [\alpha_k \mu_{eff} \nabla k] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5.13)$$

- równanie transportu dyssypacji turbulencji ϵ :

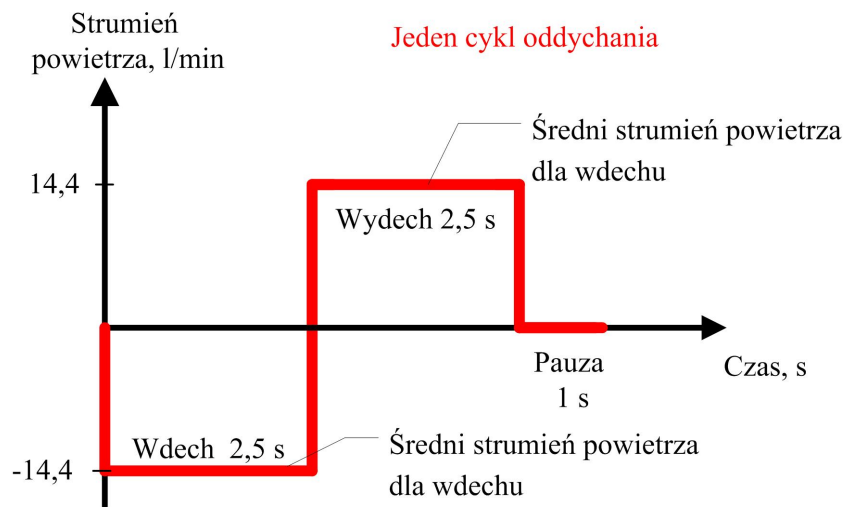
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot [\alpha_\epsilon \mu_{eff} \nabla \epsilon] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5.14)$$

gdzie G_k reprezentuje źródło energii kinetycznej powstającej w wyniku gradientu prędkości, G_b jest źródłem energii kinetycznej powstającej w wyniku wporu termicznego a Y_M reprezentuje udział odkształcenia turbulentnego w przepływie ściśliwym, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ oznacza efektywny współczynnik lepkości. Wielkości α_k i α_ϵ są turbulentnymi liczbami Prandtla. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ są stałymi parametrami modelu. Wartości współczynników w powyższych równaniach wykorzystywanych przez program *Fluent* zdefiniowano w instrukcji użytkownika programu [94].

5.1.3 Model oddychającego człowieka

W literaturze dostępne są różne modele oddychania człowieka. W uproszczonych modelach oddychania uwzględnia się jedynie ciągłe wydychanie powietrza [98, 99, 88]. Uproszczenie to pozwala wykonywać obliczenia w stanie ustalonym. Modele z pełnym cyklem oddychania obejmują: wdech, wydech i pauzę opisane funkcją nieciągłą lub funkcją sinusoidalną [100, 89, 90, 101]. Modelowanie numeryczne pełnego cyklu oddychania jest bardzo czasochłonne, wymagają najczęściej obliczeń niestacjonarnych oraz bardzo małego kroku czasowego przez cały czas trwania obliczeń. Dlatego częściej w obliczeniach numerycznych wykorzystywane są modele z ciągłym wydychaniem powietrza. W niniejszej pracy analizowano dwa modele oddychającego człowieka. Pierwszy uproszczony do ciągłego wydychania powietrza. W drugim modelu uwzględniono pełny cykl oddechowy.

Modele matematyczne oddychającego człowieka bazują na badaniach spirometrycznych określających strumień objętości powietrza wydychanego przez człowieka. Z badań Hyldgarda [100] wynika, że osoba wykonująca lekką pracę wydycha 6 litrów powietrza na minutę z częstotliwością 10 oddechów na minutę. Pojedynczy cykl oddechowy trwa 6 sekund i składa się z 2,5 sekundy wdechu, 2,5 sekundy wydechu i 1 sekundy pauzy (rysunek 5.1). Chwilowy strumień podczas wdechu i wydechu wynosi 14,4 l/min.



Rysunek 5.1: Schemat pełnego cyklu oddychania

Strumień objętości ditlenku węgla wydychanego przez człowieka obliczono z zależności 2.11 podanej w rozdziale 2.3.1. Obliczona emisja CO_2 dla śpiącego mężczyzny wynosi $3,4896 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$, co stanowi 3,49% obj. ditlenku węgla w wydychanym powietrzu.

Udział molowy CO_2 wyznaczono z zależności:

$$z_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{V}_{\text{exhaled CO}_2}}{\dot{V}_{\text{exhaled air}}} \quad (5.15)$$

Przyjęto stały udział molowy N_2 w powietrzu suchym. Udział O_2 obliczono z sumy udziałów molowych składników powietrza suchego.

$$z_{\text{O}_2} = 1 - z_{\text{N}_2} - z_{\text{CO}_2} \quad (5.16)$$

Udziały masowe składników powietrza obliczono z zależności:

$$g_i = \frac{z_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n z_i \cdot M_i} \quad (5.17)$$

Dla założonych parametrów termodynamicznych powietrza obliczono zawartość wilgoci w powietrzu.

$$x_g = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{\sum_{i=1}^n z_i \cdot M_i} \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \quad (5.18)$$

Następnie wyznaczono udziały masowe poszczególnych składników powietrza wilgotnego.

$$g'_i = \frac{g_i}{1 + x_g} \quad (5.19)$$

Dla modelu oddychania uproszczonego do ciągłego wydechu przyjęto średni strumień wydychanego powietrza 6 l/min [100]. Ilość powietrza i ditlenku węgla wydychanego w ciągu minuty jest jednakowa dla modelu z pełnym cyklem oddechowym i dla modelu z oddychaniem uproszczonym do ciągłego wydechu. Udziały masowe składników powietrza wydychanego w uproszczonym modelu oddychania przyjęto takie same w modelu z pełnym cyklem oddychania.

5.1.4 Metoda rozwiązywania układu równań

Układ równań rozwiązywany jest numerycznie. Różne metody rozwiązywania układu równań bilansowych omówione zostały w [36]. Obliczenia numeryczne w niniejszej pracy wykonano w programie *Fluent*, który do dyskretyzacji równań bilansowych wykorzystuje metodę objętości skończonych. W modelu wykorzystano drugorzędny schemat dyskretyzacji członu konwekcyjnego w równaniach bilansowych (Second-Order Upwind), który pozwolił na zwiększenie dokładności obliczeń numerycznych. Do dyskretyzacji równań ciśnienia wykorzystano schemat PRESTO. Schemat ten jest rekomendowany dla przepływów z dominującą konwekcją naturalną [94]. Jako kryterium zbieżności rozwiązania przyjęto dwukrotny spadek wielkości residuów w danym kroku czasowym jak sugeruje w [36] Ferziger i Perić. Obliczenia dla ciągłego wydychania powietrza od człowieka wykonano ze zmiennym krokiem czasowym zaczynając od bardzo małego 0,1 s i zwiększając go do 10 s w kolejnych godzin obliczeń. Obliczenia z pełnym cyklem oddychania wykonano ze stałym krokiem czasowym 0,1 s.

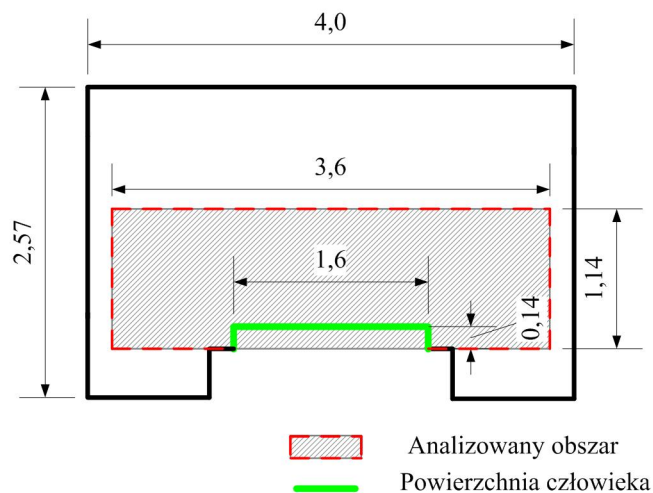
5.2 Dwuwymiarowy model numeryczny pomieszczenia

Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem dwu- i trójwymiarowego modelu pomieszczenia. Dwuwymiarowy model pomieszczenia wykorzystano do analizy niezależności rozwiązania numerycznego od zastosowanej siatki dyskretyzacji. Ponadto analizowano wpływ wielkości otworów nawiewnego i wywiewnego oraz typu warunku brzegowego na tych powierzchniach na rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu. W modelu dwuwymiarowym człowiek traktowany jest jako liniowe źródło ciepła i wydychanego powietrza. Stwarza to trudności w zachowaniu proporcji wielkości ust, ilości i prędkości wydychanego powietrza. Dlatego wyniki dwuwymiarowego rozprzestrzeniania się wydychanego ditlenku węgla często nie są fizycznie poprawne, jednakże można uznać, że błąd w przewidywaniu trendów dla rozwiązania dwu i trójwymiarowego powinien być niewielki. Istotną zaletą stosowania modeli 2D jest znacząco krótszy czas obliczeń w porównaniu do modeli 3D. Dlatego wykorzystuje się je we wstępnym etapie budowy modelu 3D.

5.2.1 Analiza wpływu siatki dyskretyzacji na wyniki modelowania

W otoczeniu człowieka przepływ powietrza zdominowany jest przez konwekcję naturalną. Analizę wpływu wielkości elementów siatki dyskretyzacji na modelowanie konwekcji naturalnej wokół człowieka przeprowadzono dla fragmentu dwuwymiarowego modelu pomieszczenia

przedstawionego na rysunku 5.2. Analizowano dwa rodzaje warunków brzegowych zadawanych na powierzchni człowieka. W pierwszym przypadku zadano jednostkowy strumień ciepła z powierzchni człowieka 30 W/m^2 , w drugim przypadku zadano temperaturę 33°C . Zadane warunki brzegowe na powierzchni człowieka przyjęto na podstawie danych z ASHRAE Fundamentals [23] oraz w oparciu o wyniki badań Murakami i Kato [102]. Analizowany fragment pomieszczenia nie był wentylowany. Na powierzchni ścian założono warunek brzegowy III-go rodzaju. Założono temperaturę powietrza 23°C i współczynnik wnikania ciepła $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Początkową temperaturę powietrza w pomieszczeniu przyjęto 23°C . Badany fragment pomieszczenia posiatkowano elementami prostokątnymi. W tabelicy 5.1 przedstawiono analizowane wielkości elementów siatki dyskretyzacji.



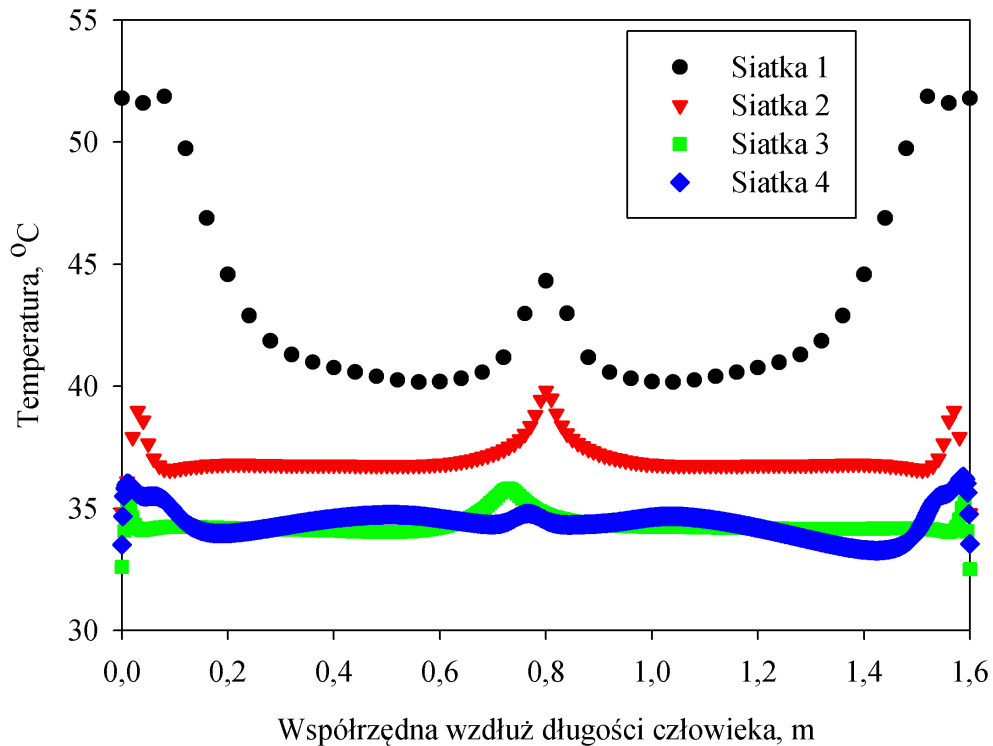
Rysunek 5.2: Schemat fragmentu dwuwymiarowego modelu pomieszczenia z człowiekiem

Tablica 5.1: Siatki dyskretyzacji wykorzystywane w analizie wrażliwości

Siatka	Siatka 1	Siatka 2	Siatka 3	Siatka 4
Wielkość elementów siatki	4 cm	1 cm	0,5 cm	0,2 cm
Liczba elementów siatki	2450	38800	155200	970000

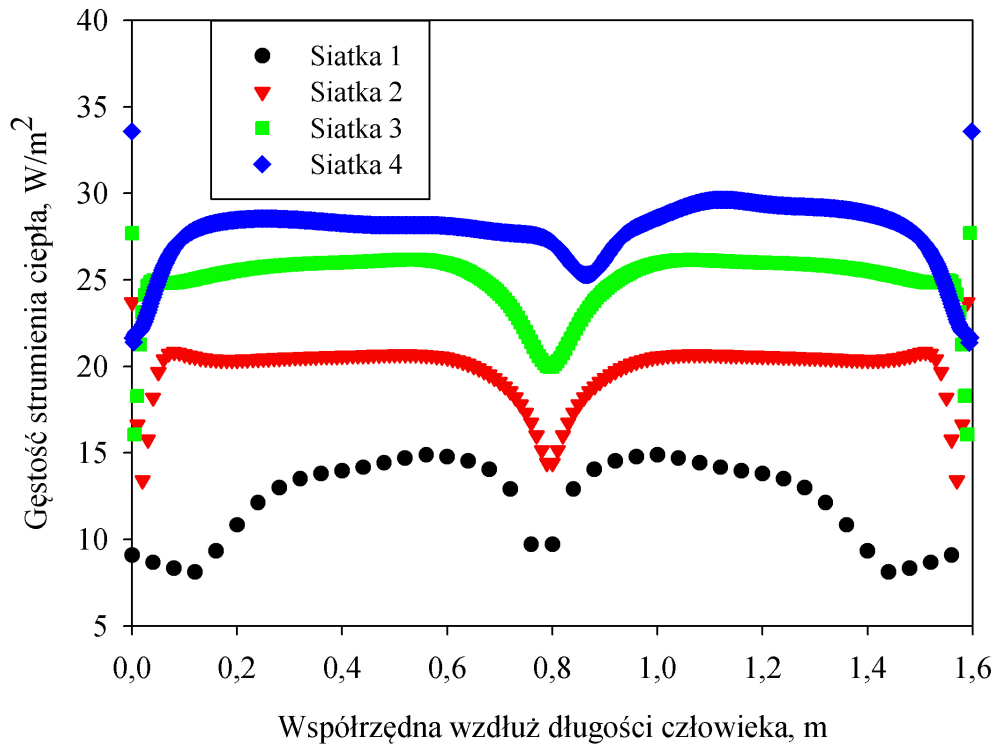
Na rysunku 5.3 przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni człowieka przy różnym zagęszczeniu elementów siatki numerycznej dla warunku brzegowego w postaci strumienia ciepła z powierzchni człowieka (30 W/m^2). Dla najrzadszej siatki (siatka 1) otrzymano zawyżone wartości temperatury powierzchni człowieka powyżej 40°C . Dla siatek złożonych z elementów o wielkości 0,5 i 0,2 cm (siatka 3 i 4) uzyskano zbliżoną temperaturę $35 \div 36^\circ\text{C}$. Można w związku z tym przyjąć, że dalsze zagęszczanie siatki nie poprawi w sposób istotny rozwiązania.

Na rysunku 5.4 przedstawiono całkowity strumień ciepła emitowany z powierzchni człowieka przy różnym zagęszczeniu siatki numerycznej. Obliczenia dla tego przypadku wyko-



Rysunek 5.3: Rozkład temperatury na powierzchni człowieka przy różnym zagęszczeniu siatki dyskretyzacji

nano z warunkiem brzegowym w postaci temperatury na powierzchni człowieka (33°C). Wartość obliczonej gęstości strumienia ciepła emitowanego przez człowieka rośnie ze wzrostem liczby elementów siatki od $10 \div 15 \text{ W/m}^2$ dla najrzadszej siatki do prawie 30 W/m^2 dla siatki dokładnej. Nieduże różnice emitowanego strumienia ciepła uzyskano dla siatki $0,5$ i $0,2 \text{ cm}$. W przedstawionych wynikach można zauważyć brak symetryczności rozwiązania (rysunek 5.4), zwłaszcza dla gęstszych siatek. Może to być spowodowane przez zbyt mały obszar modelu wokół człowieka przyjęty do analizy (warunki brzegowe na ściankach są zbyt blisko człowieka). Może to być również wytłumaczone charakterem przepływu. Przy dostatecznie dużej różnicy temperatury na grzejnej powierzchni powstaje dużo niewielkich prądów konwekcyjnych zamiast jednego dużego. Innymi słowy tak samo prawdopodobne jest powstanie prądów konwekcyjnych w dowolnym niemalże punkcie [103, 104]. Z przeprowadzonej analizy wrażliwości wynika, że do dalszych obliczeń numerycznych można przyjąć siatkę o wielkości elementów $0,5 \text{ cm}$. Dalsze zagęszczanie siatki w sposób istotny zwiększa czas obliczeń nie prowadząc do znaczącej poprawy dokładności obliczeń.



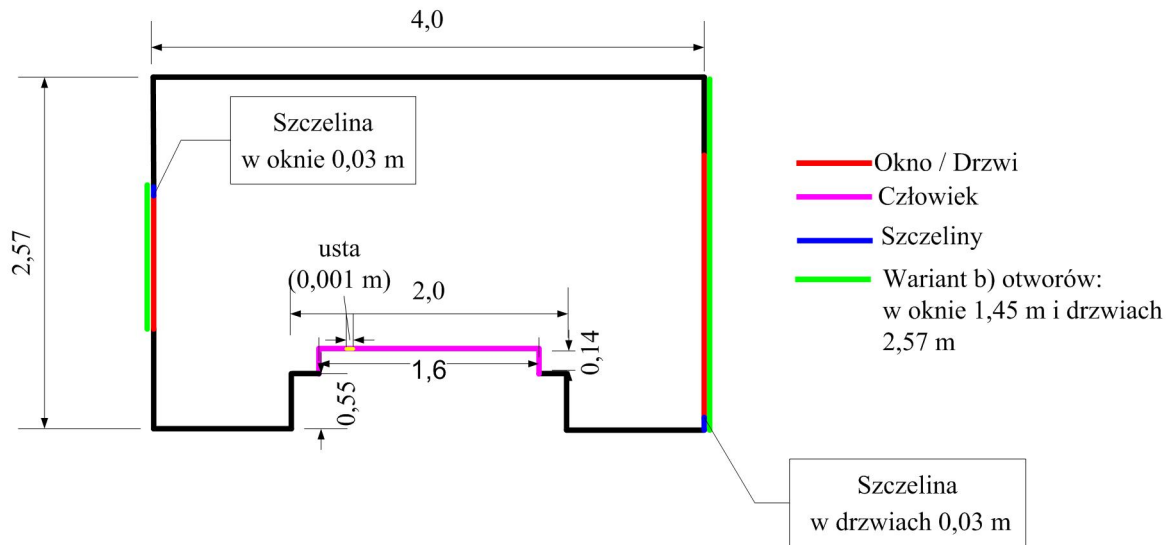
Rysunek 5.4: Całkowity strumień ciepła na powierzchni człowieka przy różnym zagęszczeniu siatki dyskretyzacji

5.2.2 Analiza wpływu sposobu modelowania nawiewu powietrza przez otwory na wyniki obliczeń numerycznych

W modelu dwuwymiarowym geometria pomieszczenia obejmuje przekrój poprzeczny trójwymiarowego pomieszczenia wzdłuż powierzchni oddychającego człowieka. Schemat modelu przedstawiono na rysunku 5.5. Wielkość otworu na usta przyjęto równą 0,001 m. Analizowano różne wielkości otworów nawiewnego i wywiewnego (rysunek 5.5). Założono strumień wydychanego powietrza równy 0,0001 m³/h. Założono adyabatyczną przegrodę dla ścian. Wartości strumieni powietrza nawiewanego do pomieszczenia przez otwór nawiewny dobrano tak aby zagwarantować jedną wymianę powietrza w pomieszczeniu na godzinę. Dla założonego strumienia CO₂ wydychanego przez człowieka powinno to dla stanu ustalonego dać stężenie równe około 1800 ppm. Pozostałe parametry powietrza przyjęte do obliczeń podano w tabelicy 5.2.

W tabelicy 5.3 przedstawiono dane do obliczeń dla analizowanych wariantów. Warianty od 1 do 8 obejmują dwa przypadki warunków brzegowych na wywiewie: „outflow” i „pressure outlet” przy zmienianej wielkości otworów nawiewnego i wywiewnego. Dla wariantu 9 aby uniemożliwić powstanie wtórnych przepływów powietrza na wywiewie założono warunek brzegowy typu „velocity inlet” natomiast na nawiewie „pressure inlet”.

Dla badań przypadków opracowano hybrydową siatkę dyskretyzacji zawierającą ele-



Rysunek 5.5: Schemat dwuwymiarowego modelu pomieszczenia z człowiekiem

Tablica 5.2: Parametry powietrza przyjęte w modelu dwuwymiarowym

Parametry powietrza	Nawiew	Wywiew (backflow)	Usta	Parametry początkowe
temperatura °C,	15	22	34	15
wilgotność względna, %	60	50	96	60
stężenie CO ₂ , ppm	400	600	40000	400

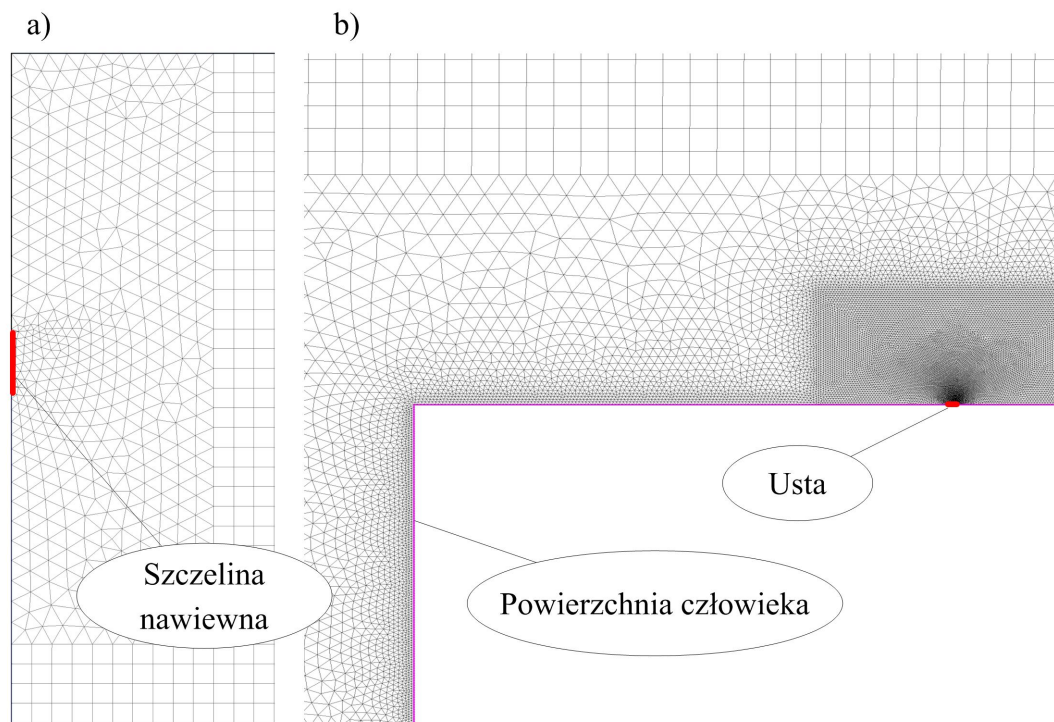
menty prostokątne i trójkątne. Liczba elementów siatki wynosi 142863 w tym 63,30% elementów prostokątnych i 36,7% elementów trójkątnych. Na rysunku 5.6 przedstawiono widok siatki w modelu dwuwymiarowym. Wielkość elementów siatki prostokątnej przyjęto 1 cm. Siatkę dyskretyzacji zagęszczono przy powierzchni człowieka, otworach nawiewnym i wywiewnym do 0,1 cm i przy ustach do 0,001 cm. Na rysunku 5.7 i 5.8 przedstawiono mapy stężenia ditlenku węgla i mapy wektorów prędkości dla wariantów obliczeń od 1 do 9 z tablicy 5.3.

W wariantach obliczeniowych 1 i 2 szczeliny nawiewna i wywiewna miały wysokość 3 cm i uzyskano dla nich zbliżone wyniki obliczeń rozkładu stężenia CO₂ i wektorów prędkości. Średnie stężenie ditlenku węgla wynosiło 1783 ppm i było zbliżone do średniego stężenia w stanie ustalonym wynoszącego 1800 ppm. Decydujący wpływ na ruch powietrza w pomieszczeniu ma strumień powietrza napływający z okna, natomiast wpływ prądów konwekcyjnych przy powierzchni ciała człowieka oraz strumienia wydychanego powietrza jest znikomy. Wpływa to również na sposób rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu.

Dla wariantów 3 i 4 założono wywiew powietrza przez całą powierzchnię. W przypadkach tych wystąpiły wtórne przepływy powietrza w otworze wywiewnym. Na rysunku 5.9 przedstawiono składowa poziomą x wektora prędkości. Można zauważyć, że w dolnej części otworu

Tablica 5.3: Różne konfiguracje warunków brzegowych

L.p.	Warunek brzegowy na nawiewie	Warunek brzegowy na wywiewie	Wielkość otworu nawiewnego, m	Wielkość otworu wywiewnego, m
1	velocity inlet	outflow	0,03	0,03
2	velocity inlet	pressure outlet	0,03	0,03
3	velocity inlet	outflow	0,03	2,57
4	velocity inlet	pressure outlet	0,03	2,57
5	velocity inlet	pressure outlet	1,4	0,03
6	velocity inlet	outflow	1,4	0,03
7	velocity inlet	outflow	1,4	2,57
8	velocity inlet	pressure outlet	1,4	2,57
9	pressure outlet	velocity inlet	1,4	2,57



Rysunek 5.6: Siatka dyskretyzacji modelu dwuwymiarowego dla analizy wrażliwości na różne typy warunku brzegowego a) wokół szczeliny nawiewnej, b) wokół człowieka

powietrze jest zasysane z pomieszczenia sąsiedniego, natomiast w górnej części otworu jest wywiewane. Jest to zgodne z obserwacjami eksperymentalnymi prowadzonymi przez Sandberga [11]. W przypadku dużych otworów powinno się stosować warunek brzegowy typu „pressure

outlet", który pozwala określić parametry powietrza dla przepływu wtórnego. Możliwość takiej nie daje warunek „outflow” co prowadzi do niefizycznego rozwiązania.

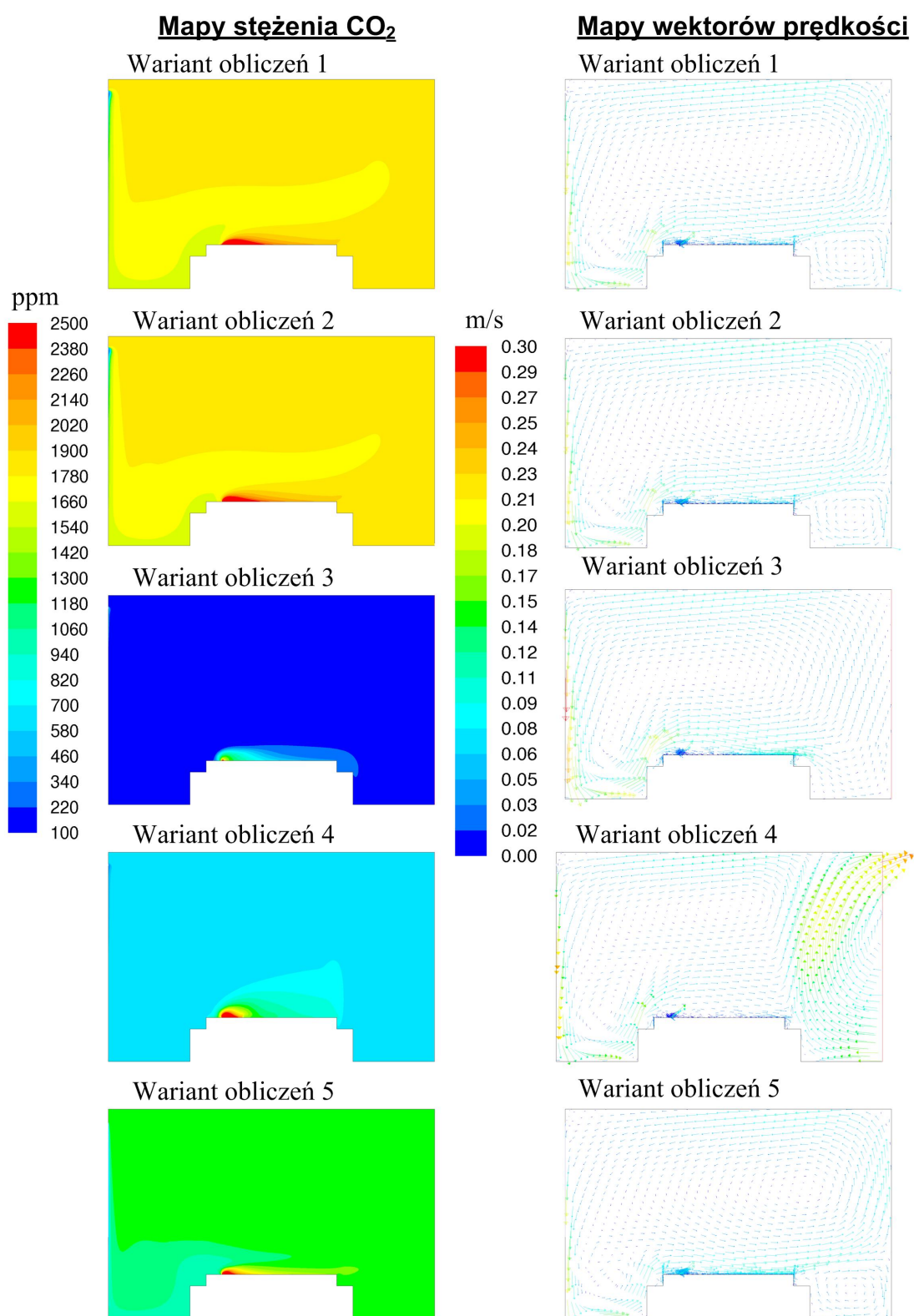
W wariantach obliczeniowych 5 i 6 założono nawiew powietrza przez otwór okienny o wysokości 140 cm i wywiew przez szczelinę w drzwiach o wysokości 3 cm. Prędkość nawiewanego powietrza dla analizowanych wariantów wynosiła 0,02 m/s. Uzyskano podobne mapy stężenia CO₂ i profile prędkości dla warunku brzegowego na wywiewie „outflow” i „pressure outlet”. Napływające przez okno świeże powietrze o niskim stężeniu ditlenku węgla opada w dół w kierunku człowieka. W pozostałej części pomieszczenia stężenie ditlenku węgla jest jednorodne. Przy małej wysokości otworu wywiewnego nie pojawiają się wtórne przepływy powietrza.

Duże otwory nawiewne i wywiewne zastosowano dla wariantów 7 i 8. Dla warunku brzegowego na wywiewie typu „outflow” uzyskano niefizyczne rozwiązanie ponieważ powietrze jest zasysane do pomieszczenia czego nie przewiduje warunek brzegowy „outflow”. Zastosowanie dużych otworów wentylacyjnych intensyfikuje znacząco mieszanie powietrza w pomieszczeniu. W otworze wywiewnym powstają dwukierunkowe przepływy. Powoduje to konieczność zakładanie parametrów powietrza napływającego do pomieszczenia przez drzwi.

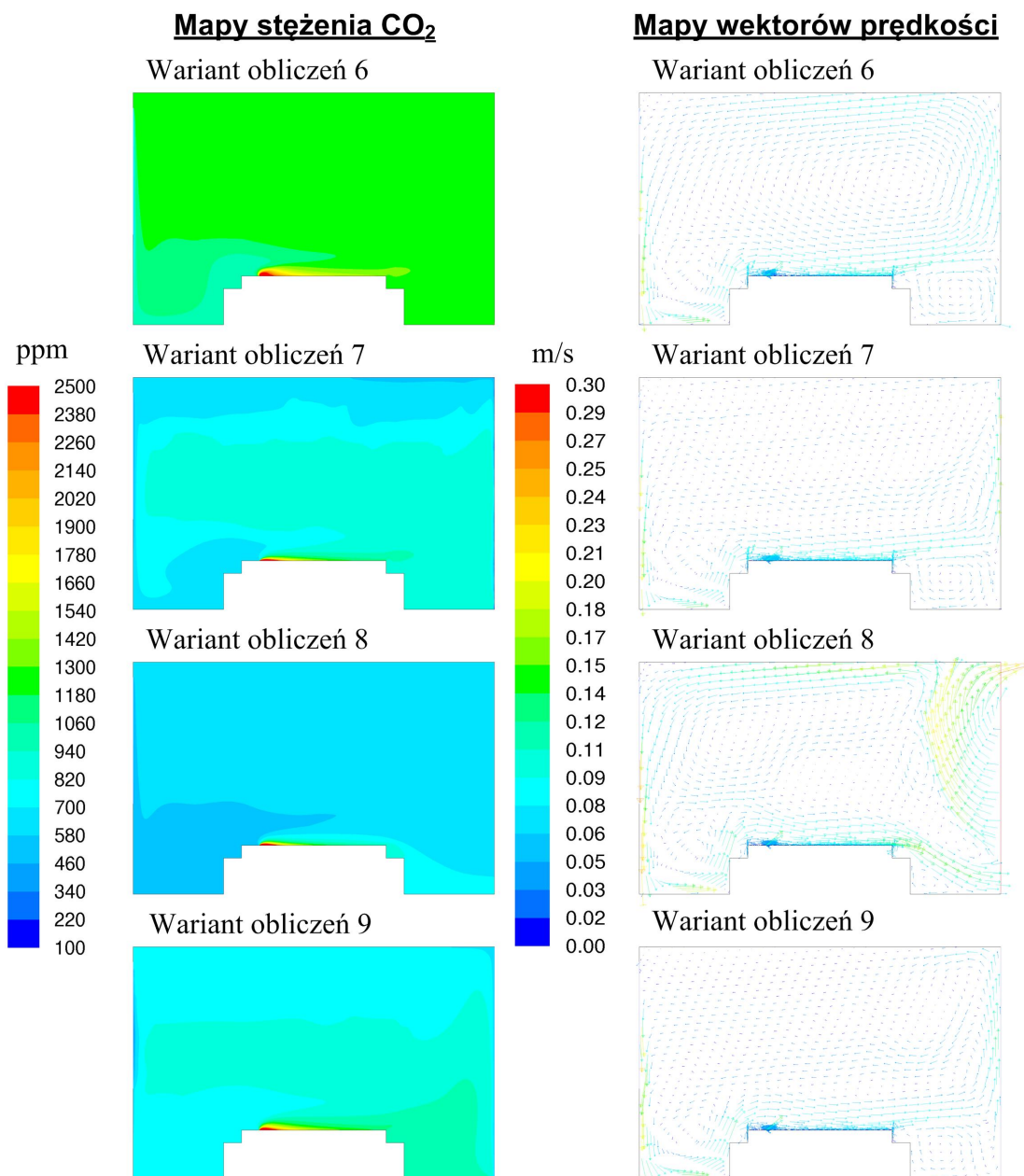
Dla wariantu 9 założono warunek brzegowy „pressure outflow” na nawiewie i „velocity inlet” na wywiewie z prędkością zadaną w kierunku na zewnątrz domeny. Założenie to pozwoliło ograniczyć wpływ wtórnych przepływów powietrza na rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Uzyskano jednak nierealistyczny obraz rozkładu stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Zastosowanie tego wariantu obliczeń nie przyniosło oczekiwanych rezultatów.

Podsumowując analizowane przypadki można sformułować następujące wnioski:

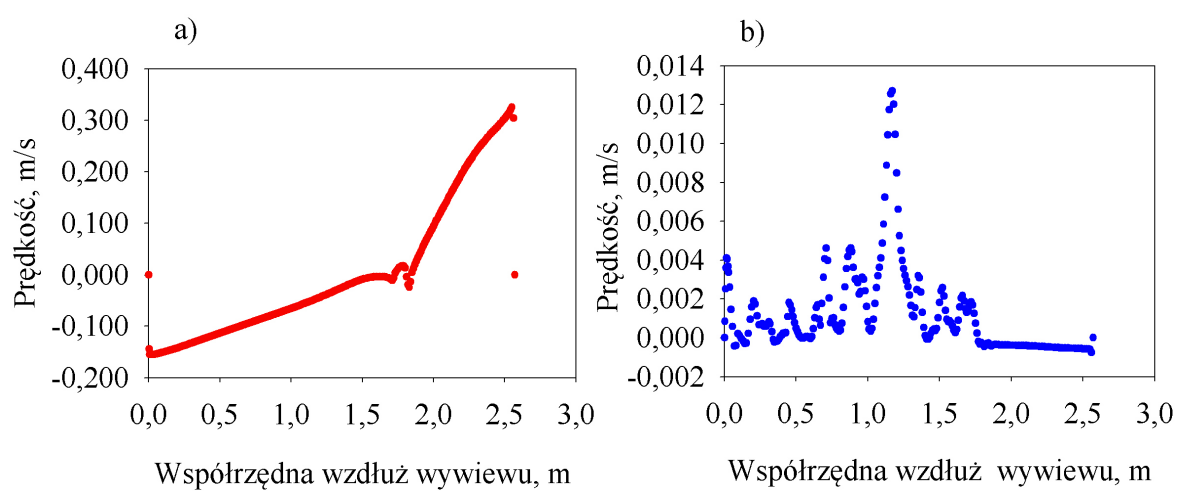
- wielkość otworów nawiewnych i wywiewnych wpływa w istotny sposób na cyrkulację powietrza w pomieszczeniu w tym szybkość rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń i ich przestrzenny rozkład,
- dla większych otworów zaobserwowano intensywniejsze mieszanie powietrza w pomieszczeniu i bardziej jednorodne pole stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu,
- wybór typu warunku brzegowego w modelu tj. „outlet” lub „pressure outflow” powinien zależeć od wielkości analizowanych otworów wentylacyjnych tak aby umożliwić uwzględnienie wtórnych przepływów powietrza,
- wtórne przepływy powietrza na wywiewie wymagają założenia parametrów powietrza wpływającego do pomieszczenia.



Rysunek 5.7: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) i wektory prędkości (m/s) dla wariantów 1-5 (opis przypadków podano tablicy 5.3)



Rysunek 5.8: cd. Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) i wektory prędkości (m/s) dla wariantów 6-9 (opis przypadków podano tablicy 5.7)



Rysunek 5.9: Profile prędkości w otworze wywiewnym dla a) przypadku 3 z warunkiem brzegowym „outflow” i b) przypadku 4 z warunkiem brzegowym „pressure outlet”

5.3 Trójwymiarowy model numeryczny pomieszczenia

5.3.1 Model geometryczny

Model geometryczny pomieszczenia przyjęto na podstawie rzeczywistych wymiarów pomieszczenia w którym prowadzono badania eksperymentalne ($2,5\text{ m} \times 3,9\text{ m} \times 2,5\text{ m}$). Model geometryczny i siatkę dyskretyzacji przygotowano wykorzystując oprogramowanie *Gambit* [105]. Stworzono dwa trójwymiarowe modele geometryczne pomieszczenia:

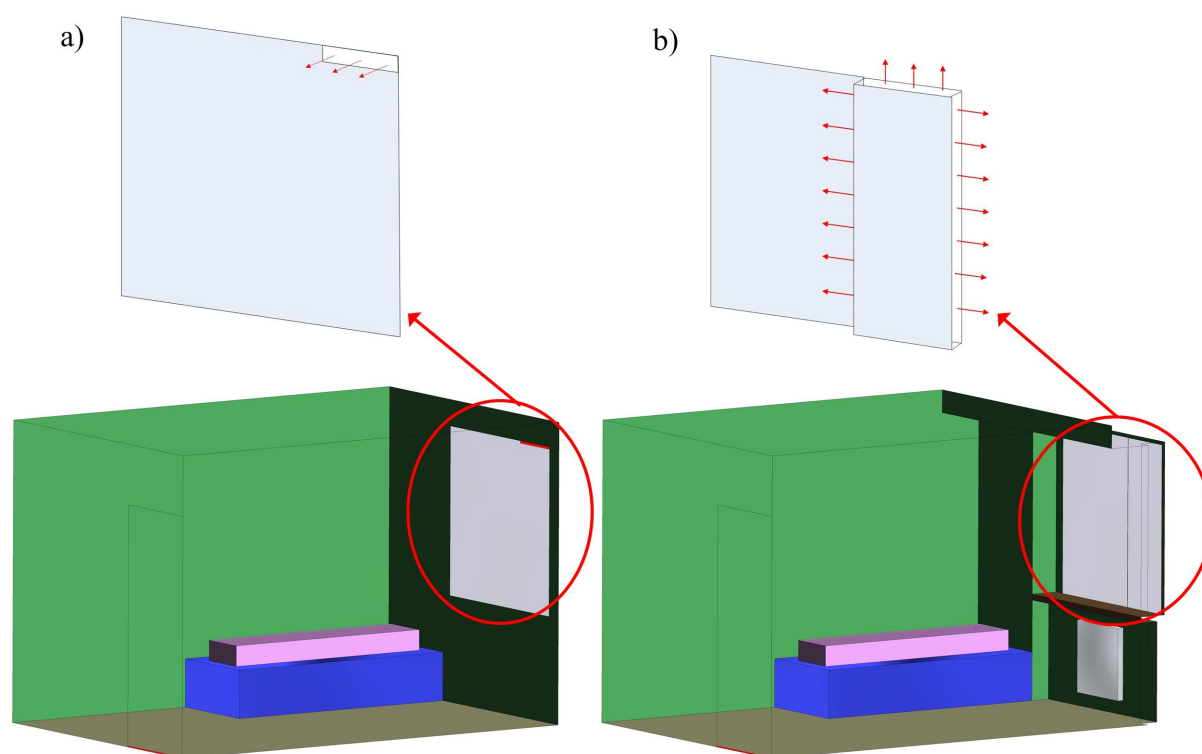
- Pierwszy model z uproszczoną geometrią pomieszczenia (rysunku 5.10a). W modelu tym szczelinę nawiewną zamodelowano jako zwykły otwór nawiewny w górnej części okna tzw. „nawietrzak”.
- Drugi model z dokładną geometrią pomieszczenia (rysunku 5.10b). W modelu tym uwzględniono wszystkie załamania ścian, wnękę podokienną i grzejnik. Szczelinę nawiewną zamodelowano jako mikro-szczelinę na obwodzie uchylnego skrzydła okiennego - okno z mikrowentylacją.

Wywiew powietrza dla obu geometrii przewidziano w szczelinie pod drzwiami o powierzchni $0,008\text{ m}^2$. Wymiary szczelin nawiewnej i wywiewnej przyjęto na podstawie wartości zmierzonych w rzeczywistym pomieszczeniu. Powierzchnię szczeliny nawiewnej dla obu geometrii przyjęto jednakową równą $0,0086\text{ m}^2$

Wewnątrz pomieszczenia zamodelowano człowieka śpiącego na łóżku. Jak pokazały testy porównawcze (tzw. „benchmark test”) opublikowane w [92] stosowanie uproszczonej geometrii człowieka jest wystarczające dla potrzeb modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Geometrię modelowanego człowieka uproszczono do prostopadłościanu o wymiarach $1,8 \times 0,3 \times 0,17\text{ m}$. Pole powierzchni człowieka w modelu numerycznym wyznaczono z zależności 2.10 opisanej w rozdziale 2.3.1 biorąc pod uwagę wzrost i masę ciała człowieka, który przebywał w pomieszczeniu w czasie pomiarów.

Modelując proces oddychania człowieka niezbędne jest właściwe przyjęcie powierzchni ust i nosa człowieka. Dostępne w literaturze modele ust zakładają ich powierzchnię $1,3 \div 3,4\text{ cm}^2$ [106, 99, 101] natomiast dla nosa przyjmuje się otwór o powierzchni $1,3\text{ cm}^2$ [70, 101] lub dwa otwory po $0,65\text{ cm}^2$ każdy [100]. W opracowanym modelu geometrycznym człowieka przyjęto dla uproszczenia oddychanie przez prostokątny otwór (usta) o wymiarach $1,3 \times 1,0\text{ cm}$ ($1,3\text{ cm}^2$).

Parametry powietrza monitorowano w 15 punktach z czego punkty od 1 do 4 pokrywają się z punktami pomiarowymi. Monitory rejestrowały stężenie ditlenku węgla, temperaturę i wilgotność względną powietrza. Rozmieszczenie monitorów CO_2 w pokoju przedstawiono na rysunku 5.11.



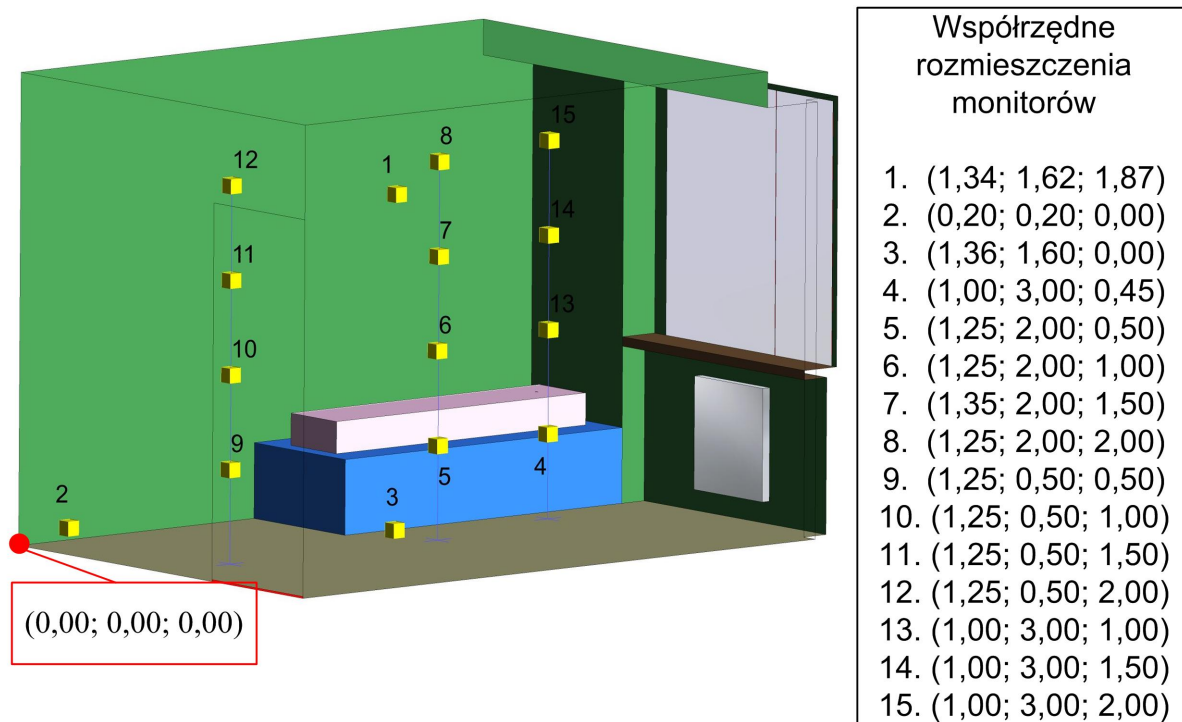
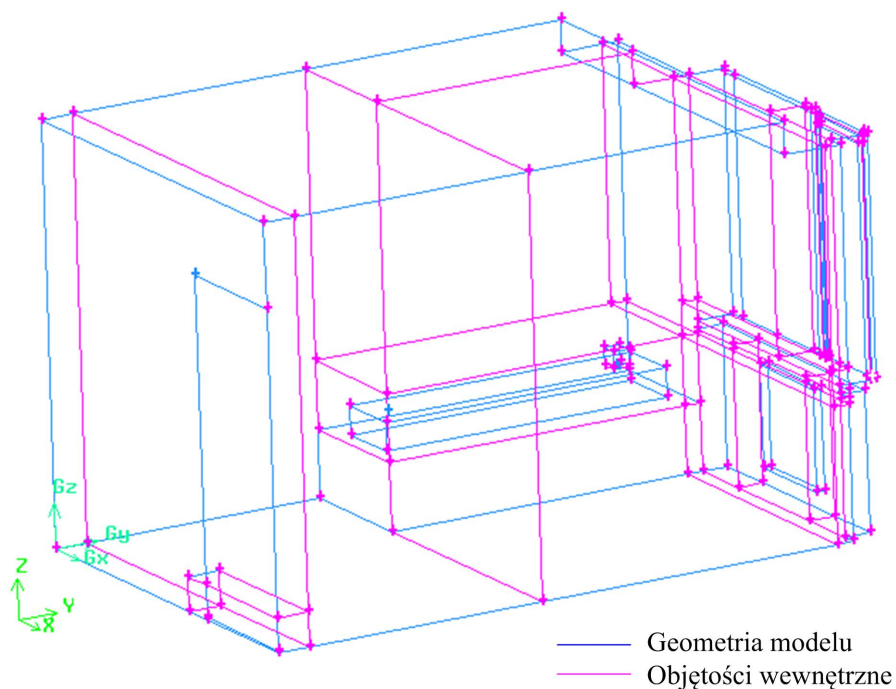
Rysunek 5.10: Model geometryczny pomieszczenia a) uproszczony - okno z nawietrzakiem, b) dokładny - okno z mikrowentylacją.

5.3.2 Siatka dyskretyzacji

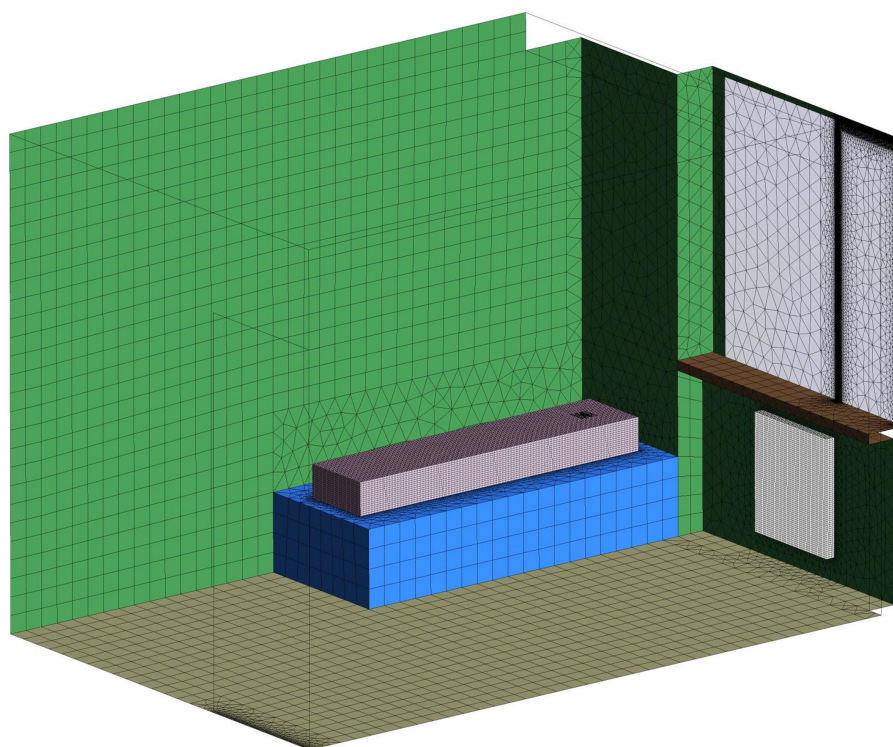
Geometria pomieszczenia podzielona została na mniejsze objętości między innymi wokół człowieka, ust, grzejnika, szczeliny nawiewnej i wywiewnej (rysunek 5.12).

Obydwa modele geometryczne pomieszczenia charakteryzują się dużymi różnicami w wielkości poszczególnych elementów pomieszczenia (przykładowo długość ścian i wielkość otworu na usta). Wymagało to zastosowania hybrydowej siatki dyskretyzacji z zagęszczeniem elementów siatki wokół bardzo małych elementów pomieszczenia. W domenach tych zastosowano niestrukturalną siatkę dyskretyzacji typu TGrid z elementami tetrahedralnymi i piramidami (rysunek 5.13). Główną domenę pomieszczenia zdyskretyzowano siatką strukturalną o elementach prostokątnymi (rysunek 5.13). Ze względu na bardzo małe wymiary ust, szczeliny nawiewnej i wywiewnej w obszarach tych zagęszczono siatkę za pomocą dostępnej w programie *Gambit* funkcji Size Function [105]. Zagęszczenie elementów siatki dyskretyzacji wykonano również wokół powierzchni człowieka (rysunek 5.14) i grzejnika (rysunek 5.15). Wielkości elementów siatki przyjęte na poszczególnych powierzchniach modelu przedstawiono w tabeli 5.4. Na rysunku 5.16 przedstawiono widok wokół łóżka i człowieka dla siatki rzadkiej i dokładnej.

Wielkości elementów siatki gęstej przyjęto dwukrotnie mniejsze w stosunku do siatki rzad-

Rysunek 5.11: Rozmieszczenie monitorów CO₂ wewnątrz modelowanego pomieszczenia

Rysunek 5.12: Dokładna geometria pomieszczenia z podziałem na wewnętrzne objętości



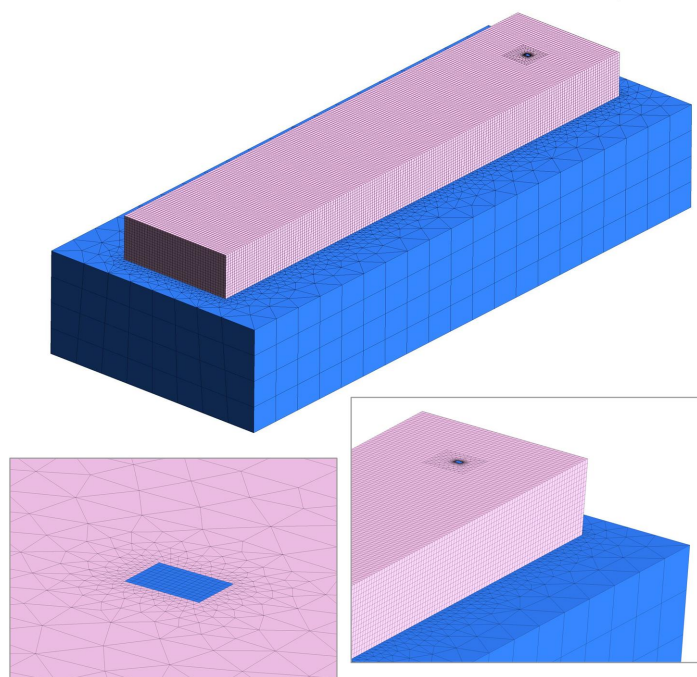
Rysunek 5.13: Siatka dyskretyzacji dokładnego modelu geometrycznego pomieszczenia

Tablica 5.4: Wielkość elementów siatki na wewnętrznych powierzchniach modelu

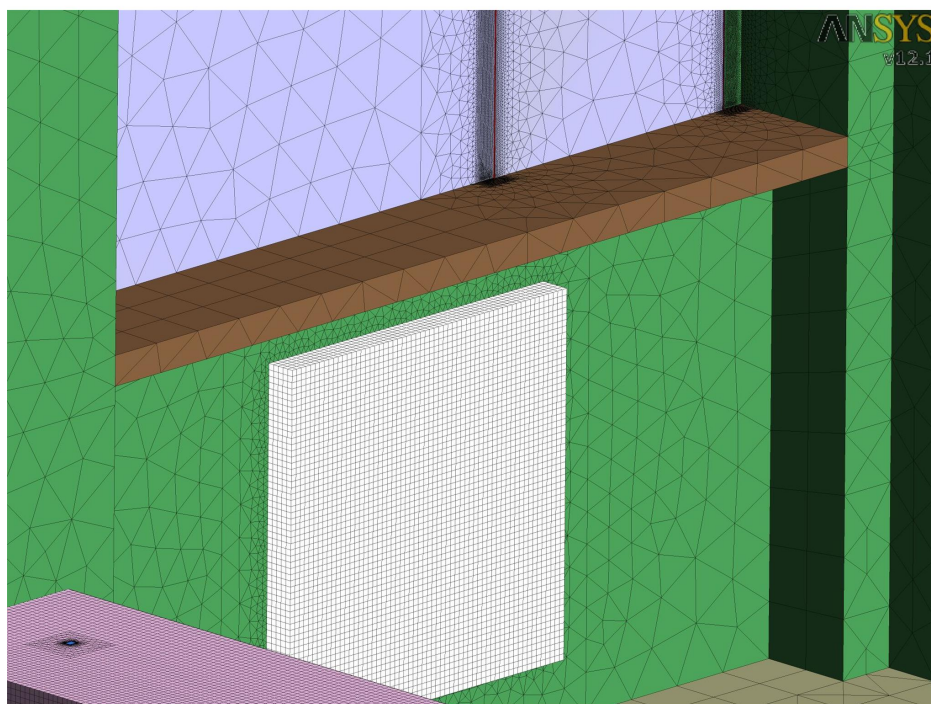
Powierzchnia	Uproszczona geometria	Dokładna geometria	
	Siatka rzadka	Siatka rzadka	Siatka dokładna
Szczelina w oknie i drzwiach, usta	0,001 m	0,001 m	0,0005 m
Człowiek, grzejnik	0,01 m	0,01 m	0,005 m
Pozostały obszar domeny	0,1 m	0,1 m	0,05 m

kiej. Dalsze zmniejszanie wielkości elementów siatki ograniczone jest możliwościami obliczeniowymi komputera. Zwiększenie elementów siatki do 20 cm w głównej domenie spowodowałoby zbyt duże błędy obliczeń. Dla modelu z dokładną geometrią okna przeprowadzono obliczenia dla dwóch siatek rzadkiej i dokładnej. Natomiast dla modelu z uproszczoną geometrią przygotowano tylko siatkę rzadką. Łączną liczbę elementów siatki dla każdej geometrii przedstawiono w tablicy 5.5.

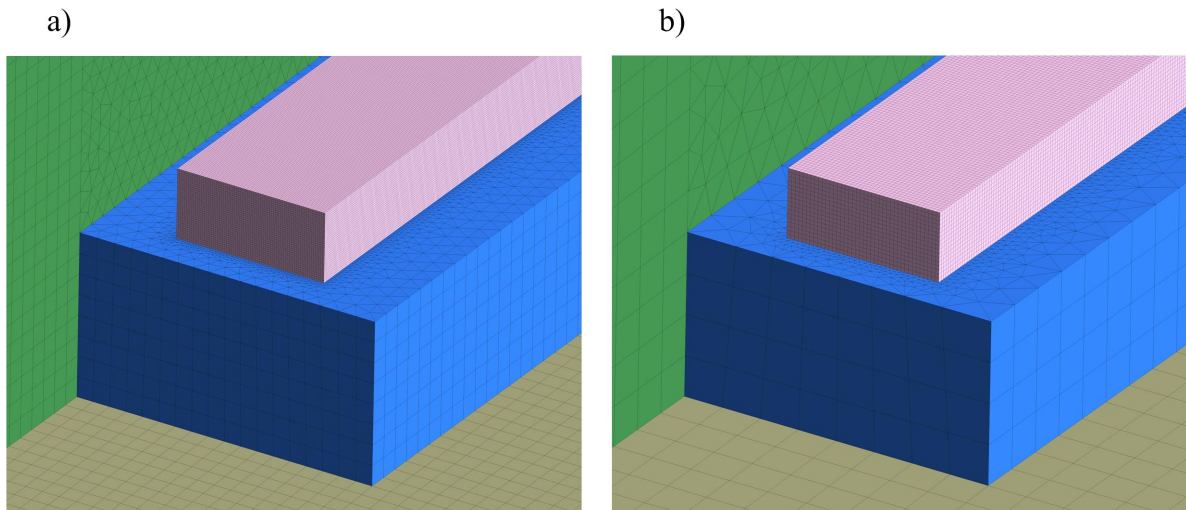
Z punktu widzenia dokładności obliczeń numerycznych bardzo istotna jest jakość elementów siatki. Jednym z parametrów opisującym jakość siatki jest EAS (Equivalent Angle Skew-



Rysunek 5.14: Siatka dyskretyzacji (rzadka) wokół człowieka



Rysunek 5.15: Siatka dyskretyzacji (rzadka) w szczelinie okiennej dla dokładnego modelu pomieszczenia



Rysunek 5.16: Siatka dyskretyzacji a) rzadka, b) dokładna

Tablica 5.5: Liczba elementów siatki w zależności od geometrii modelu

Elementy siatki	Uproszczona geometria Rzadka siatka	Dokładna geometria Rzadka siatka	Dokładna geometria Dokładna siatka
Wszystkie	684 825	1 101 919	3 911 418
Heksahedralne	23571, (3,44%)	22890, (2,08%)	158492, (4,05%)
Tetrahedralne	629766, (91,96%)	1054626, (95,71%)	3607698, (92,24%)
Piramidy	31488, (4,60%)	24403, (2,21%)	145228, (3,71%)

ness), który opisuje stopień skrzywienia elementów siatki numerycznej [105]:

$$Q_{EAS} = \max \left\{ \frac{\theta_{max} - \theta_{eq}}{180 - \theta_{eq}}, \frac{\theta_{eq} - \theta_{min}}{\theta_{eq}} \right\} \quad (5.20)$$

gdzie θ_{max} i θ_{min} są maksymalnym i minimalnym kątem (w stopniach) pomiędzy bokami elementu, θ_{eq} odpowiada charakterystycznemu kątowi elementu równobocznego. Dla elementów trójkątnych i czworobocznych $\theta_{eq} = 60$, natomiast dla czworobocznych i sześciobocznych $\theta_{eq} = 90$. Dla idealnych elementów czworobocznych parametr ten przyjmuje wartość 0 natomiast dla mocno skrzywionych elementów przyjmuje wartość 1. Zakłada się, że trójwymiarowa siatka jest bardzo dobrej jakości gdy średnia wartość tego parametru nie przekracza wartości 0,4. W tablicy 5.6 przedstawiono wartości parametru EAS skrzywienia elementów siatki dla wygenerowanych siatek. Średnia wartość parametru EAS wynosi 0,32 dla rzadkiej siatki w modelu z uproszczoną geometrią oraz 0,36 i 0,34 dla siatki rzadkiej i dokładnej w modelu z dokładną geometrią pomieszczenia. Analiza uzyskanych wartości parametru EAS pozwala na stwierdzenie, że uzyskano zadowalającą jakość siatek.

Tablica 5.6: Procentowy udział parametru określającego skrócenie elementów siatki

Zakres	Uproszczona geometria	Dokładna geometria Siatka 1 (dokładna)	Dokładna geometria Siatka 2 (rzadsza)
<0,0;0,2>	29,44	28,35	24,11
<0,2;0,4>	42,48	39,64	43,46
<0,4;0,6>	21,78	23,82	25,53
<0,6;0,8>	6,21	8,16	6,81
<0,8;1,0>	0,09	0,03	0,09

5.3.3 Warunki brzegowe i początkowe

Modelowanie zjawisk przepływu powietrza i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w pomieszczeniu wymaga przyjęcia warunków początkowych i brzegowych. Warunki brzegowe i początkowe dla modelowanych zjawisk przyjęto wykorzystując wyniki przeprowadzonych pomiarów omówionych w rozdziale 3.

Dla potrzeb opracowanego modelu matematycznego pomieszczenia zdefiniowano następujące warunki brzegowe:

- dla powietrza nawiewanego przez szczelinę w oknie i przez usta przyjęto znany strumień masowy powietrza („mass flow inlet”),
- dla powietrza wywiewanego przyjęto warunek typu „outflow”,
- dla pozostałych elementów modelu tj. powierzchni człowieka, ścian, okna i grzejnika przyjęto warunek brzegowy pierwszego rodzaju zadając wartości temperatury zmierzone w czasie eksperymentu.

Strumień powietrza nawiewanego przez szczelinę pod drzwiami obliczono na podstawie wyników pomiarów uzyskując 0,0081229 kg/s. Temperaturę powietrza nawiewanego przyjęto 10°C a wilgotność względną 60%. Stężenie CO₂ w powietrzu nawiewanym przyjęto w oparciu o pomiar 382 ppm.

Parametry powietrza wydychanego przez człowieka tj. temperaturę i wilgotność względną przyjęto na podstawie danych literaturowych. Hyldgaard [100] podaje, że osoba wykonująca lekką pracę wydycha powietrze o temperaturze 31°C i wilgotności względnej 96%. Höpfe w [107] podaje temperaturę wydychanego powietrza w funkcji temperatury wewnątrz pomieszczenia i wilgotności względnej. Do obliczeń przyjęto temperaturę wydychanego powietrza 34 °C, i wilgotność względną 96%.

Warunki brzegowe na ustach dla przypadku z pełnym cyklem oddychania zadano wykorzystując funkcję UDF (User Defined Function). Funkcje te stanowią zewnętrzne procedury w programie *Fluent*, które są dynamicznie ładowane przez solver programu i wzbogacają jego podstawowy

kod [94].

Dla ściany zewnętrznej przyjęto temperaturę 19°C, natomiast dla pozostałych ścian 20°C. Temperaturę powierzchni człowieka przykrytego kołdrą przyjęto na podstawie uśrednionego pola temperatury zmierzonego kamerą termowizyjną. Średnią temperaturę powierzchni człowieka przyjęto 23,5°C. Na powierzchni okna przyjęto 17°C. Przeanalizowano również przypadek z włączonym grzejnikiem zadając temperaturę na powierzchni grzejnika 60°C określoną na podstawie zdjęć kamerą termowizyjną.

Początkowe parametry powietrza wewnętrznego określono na podstawie danych zarejestrowanych przez używane w pomiarach mierniki Jakości Środowiska Wewnętrznego. Założono temperaturę 19°C i wilgotność 39% natomiast początkowe stężenie CO₂ w pomieszczeniu przyjęto 385 ppm. Udziały masowe składników powietrza nawiewanego i wydychanego przez człowieka oraz powietrza w pomieszczeniu na początku pomiarów przedstawiono w tabelicy 5.7.

Tablica 5.7: Udziały masowe składników powietrza

Składniki powietrza	Powietrze wydychane	Powietrze nawiewane	Warunki początkowe
CO ₂	0,053468	0,000584	0,000589
O ₂	0,182589	0,230622	0,230423
H ₂ O	0,031495	0,004662	0,005498

5.3.4 Wyniki obliczeń numerycznych

Wykorzystując opracowany model numeryczny i wyniki pomiarów stężenia CO₂ w pomieszczeniu przeprowadzono wielowariantowe obliczenia numeryczne. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z danymi eksperymentalnymi [108]. Przeprowadzono również analizę wpływu następujących parametrów:

- wielkości elementów siatki numerycznej,
- wielkości emisji CO₂ od człowieka,
- przyjętego modelu oddychania [108],
- gorącej powierzchni grzejnika oraz
- dokładności odwzorowania otworu nawiewnego,

na rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu. W tabelicy 5.8 przedstawiono ustalenia przyjęte dla analizowanych wariantów.

Tablica 5.8: Warianty ustawień dla analizowanych przypadków w modelu trójwymiarowym

Analizowany przypadek	Numer rozdziału	Geometria		Siatka numeryczna		Model oddychania		Grzejnik	
		dokładna	uproszczona	dokładna	rzadka	stała emisja	cykl oddychania	włączony	wyłączony
1	5.3.4.1	x	-	x	-	x	-	-	x
2	5.3.4.1, 5.3.4.2, 5.3.4.3, 5.3.4.4, 5.3.4.5, 5.3.4.6	x	-	-	x	x	-	-	x
3	5.3.4.4	x	-	-	x	-	x	-	x
4	5.3.4.5	-	x	-	x	x	-	-	x
5	5.3.4.6	x	-	-	x	x	-	x	-

5.3.4.1 Analiza wpływu wielkości elementów siatki dyskretyzacji na wyniki obliczeń numerycznych

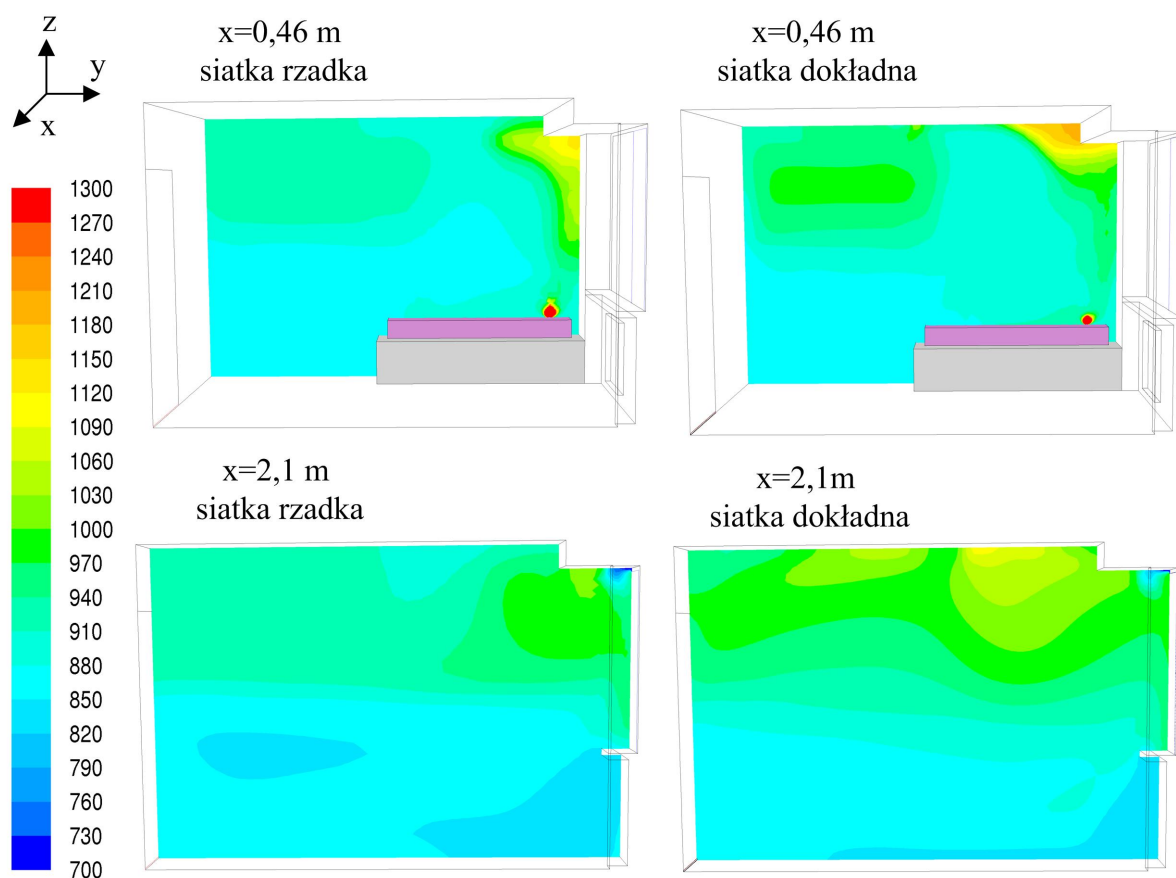
Przeprowadzono analizę wpływu wielkości elementów na uzyskane wyniki obliczeniowe (przypadek 1 i 2 wg tablicy 5.8). Analizowano siatki o wymiarach 5 cm (siatka dokładna) i 10 cm (siatka rzadka).

Na rysunku 5.17 przedstawiono mapy stężenia ditlenku węgla w płaszczyźnie pionowej pomieszczenia dla $x=0,406$ m i $x=2,1$ m dla obydwu siatek dyskretyzacji. Zaobserwowano bardzo niewielkie różnice w obliczonym przy różnym zagęszczeniu siatki stężeniu CO_2 w dolnych partiach pomieszczenia. Większe różnice stężenia uzyskano w górnych partiach pomieszczenia. Wyższe stężenia CO_2 wystąpiły dla dokładnej siatki numerycznej. Dla obu siatek numerycznych uzyskano podobne profile stężenia ditlenku węgla w górnych partiach pomieszczenia.

Na rysunku 5.18 porównano rozkłady czasowe stężenia ditlenku węgla dla monitora 1 umieszczonego pod sufitem i monitora w szczelinie pod drzwiami (rysunek 5.11). Średnie stężenie ditlenku węgla w szczelinie pod drzwiami obliczono z zależności:

$$\frac{1}{\dot{m}} \sum_{i=1}^n Y_i \dot{m}_i \quad (5.21)$$

gdzie: Y_i określa udział masowy ditlenku węgla, \dot{m} jest strumieniem masowym przepływającym przez i -ty element powierzchni szczeliny. Z analizy zamieszczonych na rysunku 5.18 rozkładów stężenia CO_2 wynika, że uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych przy różnym zagęszczeniu siatki przebiegi są do siebie zbliżone. Maksymalne różnice nie przekraczają 45



Rysunek 5.17: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) w płaszczyźnie pionowej dla $x = 0,46$ oraz $x = 2,1$ m dla siatki rzadkiej i dokładnej

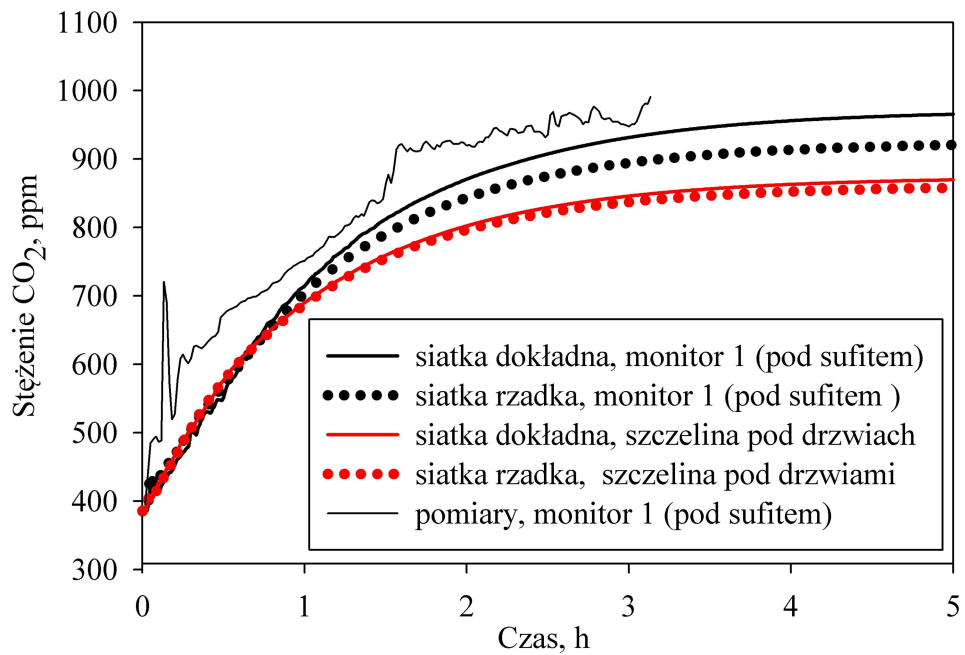
ppm po ustabilizowaniu się profilu CO_2 po 5 godzinach dla monitora 1 umieszczonego pod sufitem. Natomiast dla monitora umieszczonego pod drzwiami uzyskano prawie jednakowe przebiegi stężenia ditlenku węgla.

Na rysunku 5.19 porównano czasowe przebiegi średniego masowego stężenia ditlenku węgla w całym pomieszczeniu. Średnie masowe stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu obliczono jako średnią objętościową z zależności:

$$\frac{\sum_{i=1}^n Y_i \varrho_i |V_i|}{\sum_{i=1}^n \varrho_i |V_i|} \quad (5.22)$$

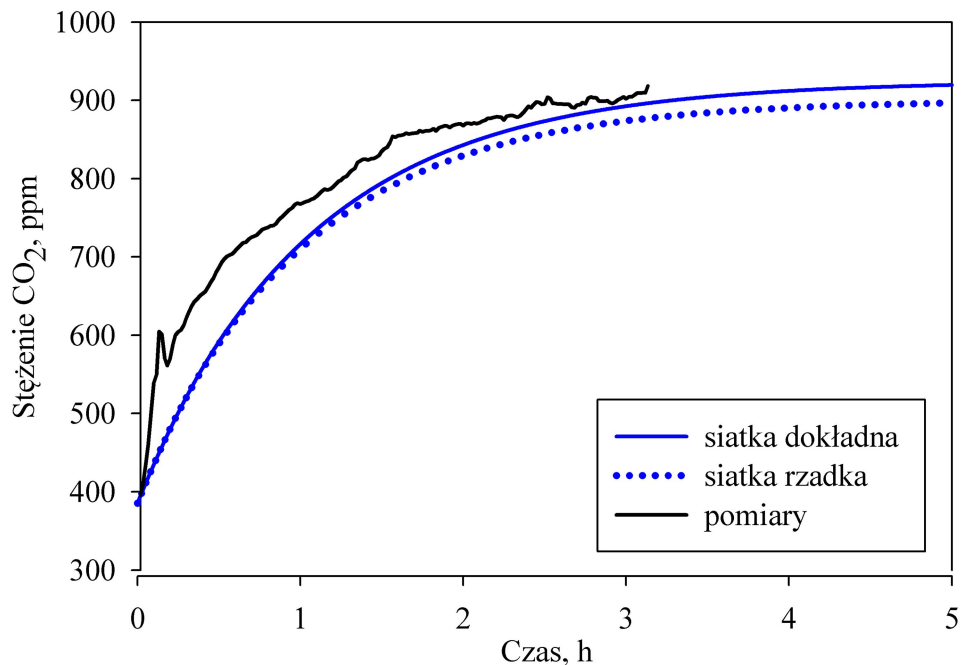
gdzie: V_i jest objętością elementu siatki (komórki).

Różnice średniego stężenia dla obu siatek dyskretyzacji narastają bardzo wolno w czasie obliczeń. Po 5 godzinach uzyskano różnice stężenia CO_2 dla siatki rzadkiej i dokładnej rzędu 20 ppm. Porównując obliczone numerycznie średnie stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu ze średnim stężeniem pomiarowym (z czterech czujników) ditlenku węgla zaobserwowano, że



Rysunek 5.18: Profile stężenia ditlenku węgla (ppm) dla monitora umieszczonego pod sufitem i w szczelinie pod drzwiami dla dwóch siatek numerycznych

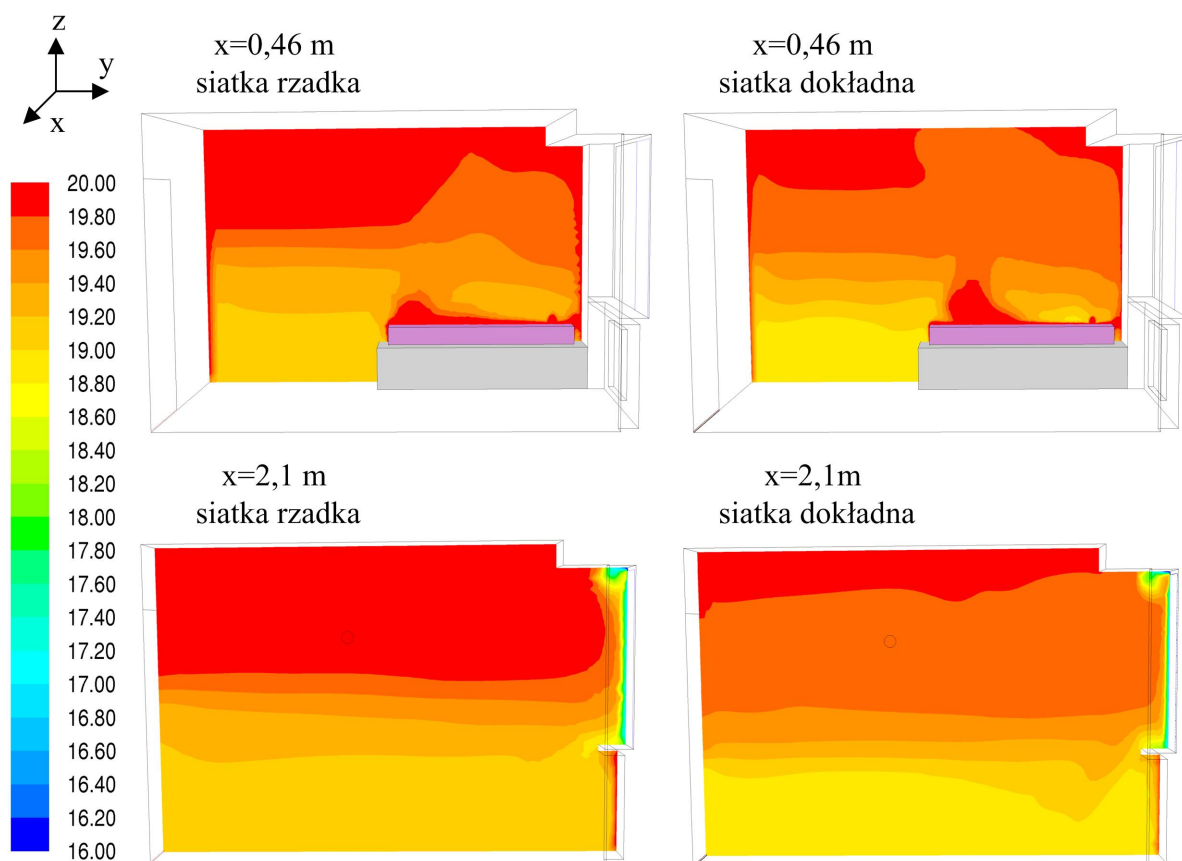
różnice te maleją w czasie i po około 2 godzinach nie przekraczają 20 ppm.



Rysunek 5.19: Profile średniego masowego stężenia ditlenku węgla (ppm) w pomieszczeniu dla dwóch siatek numerycznych

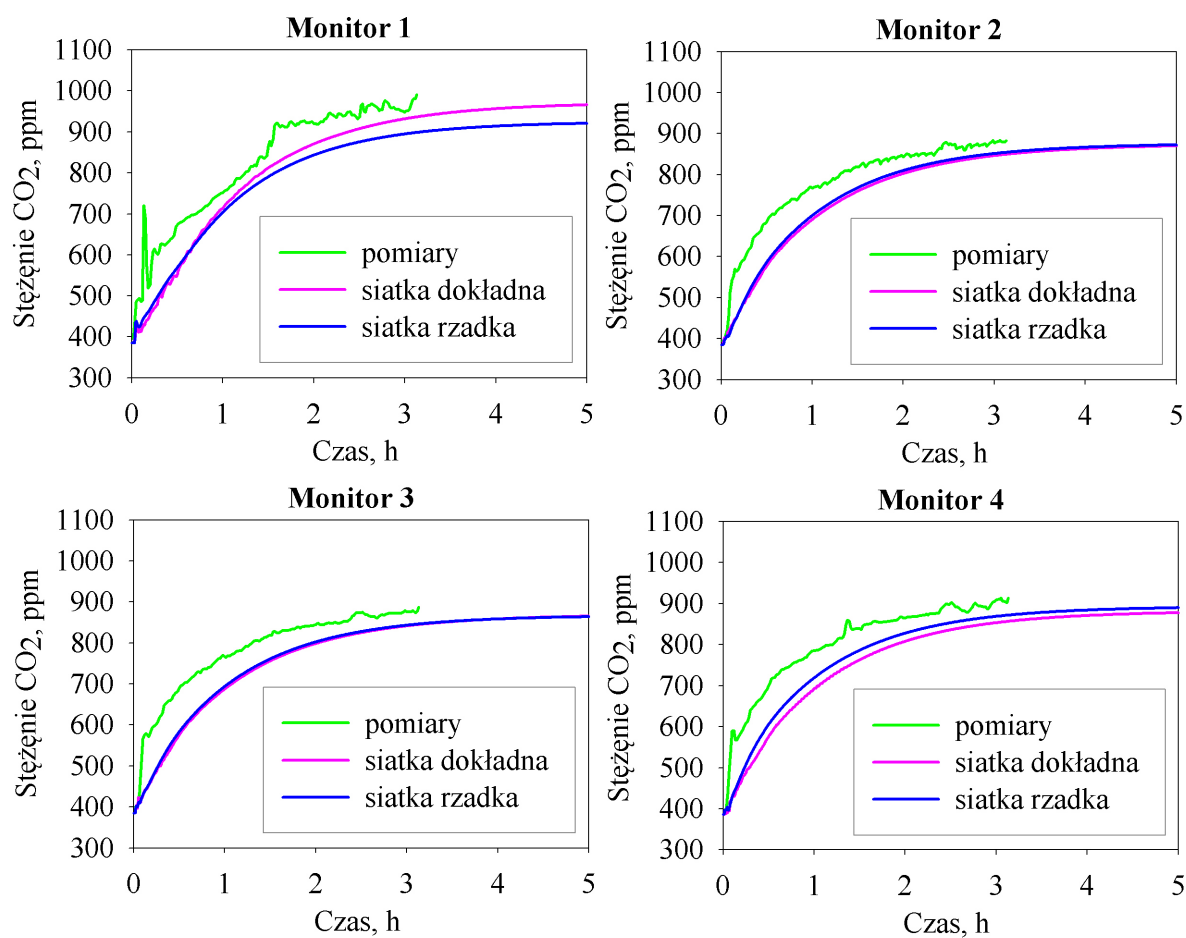
Porównano również profile temperatury uzyskane dla obydwu siatek. Na rysunku 5.20

przedstawiono mapy temperatury w płaszczyźnie $x=0,406$ m i $2,1$ m. Nie zaobserwowano znaczących różnic w profilach i wartościach temperatury w różnych płaszczyznach modelowanego pomieszczenia dla badanych siatek dyskretyzacji.



Rysunek 5.20: Mapy temperatury ($^{\circ}\text{C}$) w płaszczyźnie pionowej dla $x=0,46$ oraz $x=2,1$ m dla siatki rzadkiej i dokładnej

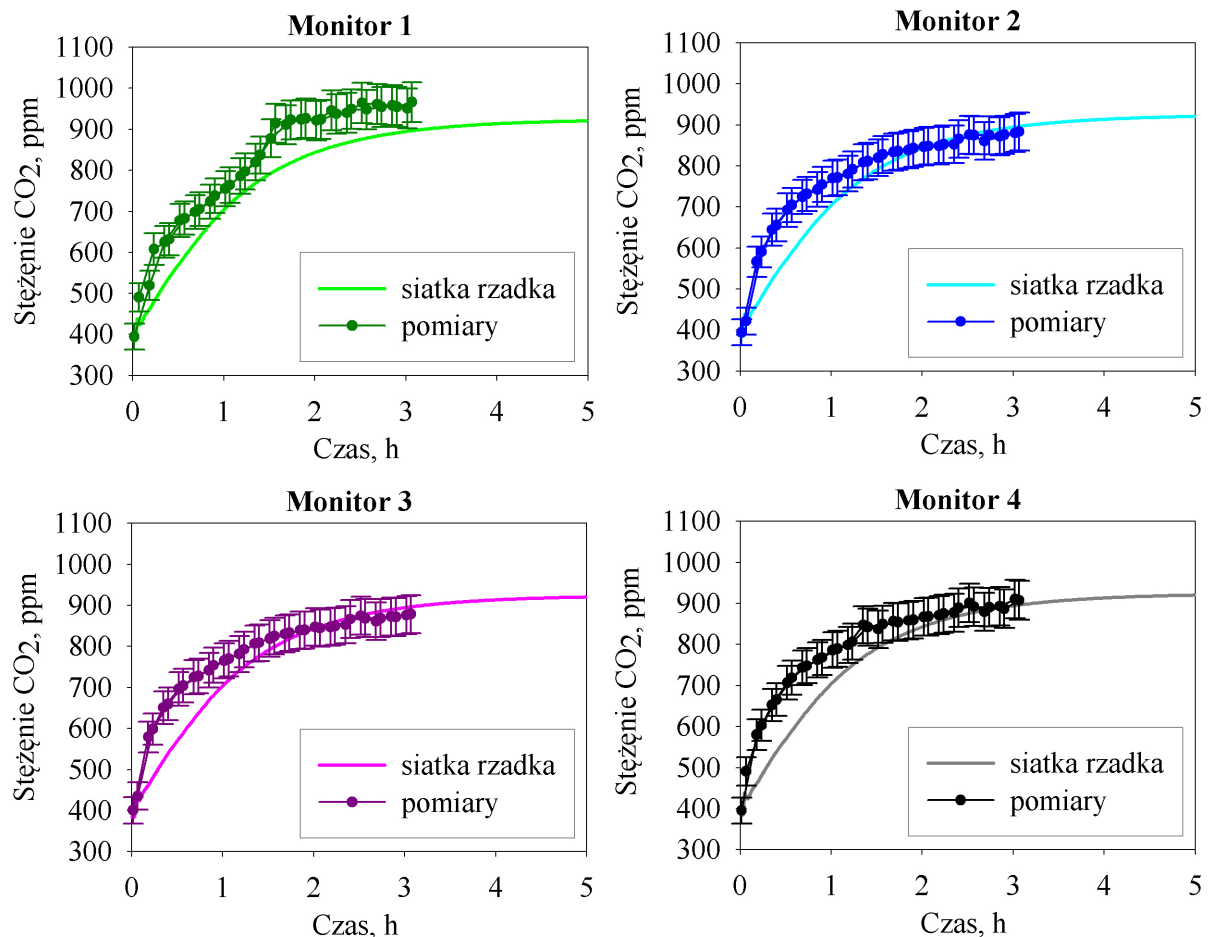
Na rysunku 5.21 porównano profile stężenia ditlenku węgla obliczone dla dwóch siatek dyskretyzacji z dostępnymi danymi pomiarowymi w czterech punktach pomieszczenia. Zaobserwowano, że przebiegi stężenia ditlenku węgla z obliczeń numerycznych są nieznacznie niższe od wartości zmierzonych w analizowanych punktach. Dla monitora 1 umieszczonego pod sufitem lepsze wyniki daje siatka dokładniejsza. Po trzech godzinach pomiarów różnice stężenia pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi wahają się od 16 ppm dla siatki dokładnej do 53 ppm dla siatki rzadkiej. Lepszą zbieżność wyników uzyskano dla monitorów 2 i 3. Przebiegi stężenia dla obydwu siatek są prawie identyczne z różnicą do 3 ppm po czasie 5 godzin obliczeń. Porównując wyniki obliczeń dla monitorów 2 i 3 z pomiarami różnice stężenia nie przekroczyły 25 ppm dla siatki rzadkiej i 30 ppm dla siatki dokładnej po 3 godzinach. Dla monitora 4 stężenia CO_2 bliższe wartościom zmierzonym uzyskano dla rzadszej siatki dyskretyzacji z różnicą 40 ppm, natomiast dla gęstszej siatki uzyskano różnicę 55 ppm.



Rysunek 5.21: Porównanie zmierzonych i obliczonych numerycznie przebiegów stężenia dwutlenku węgla dla czterech monitorów

5.3.4.2 Porównanie wyników modelowania numerycznego z eksperymentem

Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami eksperymentu przeprowadzonego w sypialni ze śpiącym człowiekiem. Wykorzystując wyniki analizy przedstawionej w punkcie 5.3.4.1 z uwagi na czas obliczeń postanowiono dalsze obliczenia numeryczne prowadzić dla rzadszej siatki. Wykorzystano uproszczony model oddychania z ciągłym wydychaniem powietrza (przypadek 2 wg tablicy 5.8). Na rysunku 5.22 przedstawiono obliczone i zmierzone przebiegi stężenia ditlenku węgla w czterech punktach pomieszczenia (monitory 1 - 4 wg rysunku 5.11). Analiza zamieszczonych wyników wskazuje, że obliczone wartości stężenia CO₂ są niższe od wartości zmierzonych w szczególności dla monitora 1 umieszczonego pod sufitem. Jednak różnice te maleją w czasie. Po czasie 1,5 h wartości obliczone stężenia CO₂ mieszczą się w granicach niepewności pomiarowej czujników CO₂ wynoszącej 20 ppm \pm 3% wskazania czujnika.



Rysunek 5.22: Porównanie zmierzonych i obliczonych numerycznie przebiegów stężenia ditlenku węgla dla czterech monitorów, słupki oznaczają niepewność pomiarów

Rozbieżności w przebiegu krzywych pomiarowych i obliczonych zaobserwowano dla początkowego odcinka pomiarów. W pierwszych kilkunastu minutach pomiarów obserwujemy

duży skok stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Najprawdopodobniej wynika on ze sposobu prowadzenia pomiarów. Przed rozpoczęciem pomiarów pomieszczenie było intensywnie wietrzone w celu uzyskania ustalonych parametrów powietrza w pomieszczeniu. Następnie do pomieszczenia wchodziła osoba i kładła się spać. Metabolizm osoby nieśpiącej na początku pomiarów był wyższy niż w czasie snu a więc także ilość wydychanego ditlenku węgla. Zmiana aktywności metabolicznej z 1 met do 0,7 met w czasie snu odpowiada zmniejszeniu ilości wydychanego CO₂ o około 40%. Wejście osoby do pomieszczenia spowodowało również większy poziom turbulencji powietrza powodując tym samym intensywnie mieszanie się powietrza i szybki wzrost stężenia ditlenkiem węgla rejestrowanego przez czujniki. Wpływ ten nie został uwzględniony w obliczeniach numerycznych, ponieważ przyjęto stałą wartość emitowanego ditlenku węgla obliczoną dla osoby będącej w spoczynku. Inną przyczyną początkowego skoku stężenia ditlenku węgla mogło być otwarcie drzwi podczas wchodzenia osoby do pomieszczenia i napływ powietrza o podwyższonym stężeniu ze strefy sąsiedniej.

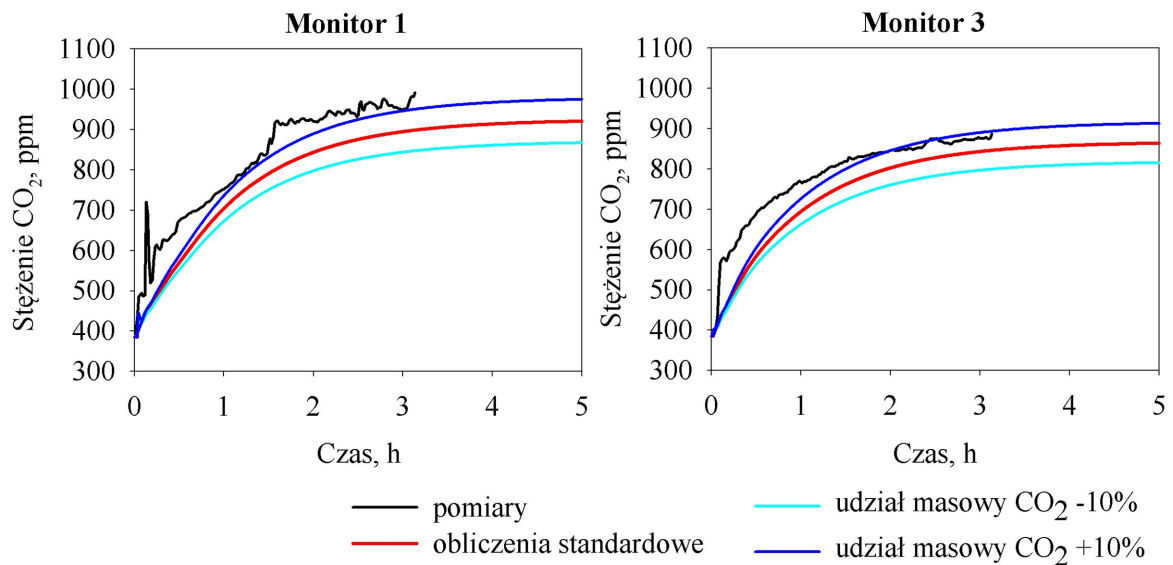
5.3.4.3 Analiza wpływu zmiany zawartości ditlenku węgla w wydychanym powietrzu

Przeprowadzono analizę wpływu zmiany udziału masowego stężenia ditlenku węgla w wydychanym powietrzu o $\pm 10\%$ na przestrzenny rozkład stężenia CO₂ w pomieszczeniu. Przeanalizowano mapy stężenia ditlenku węgla w różnych przekrojach pomieszczenia oraz czasowe przebiegi stężenia w wybranych 15 punktach pomieszczenia (współrzędne monitorów podano na rysunku 5.11). Dla zwiększonego o 10% udziału masowego ditlenku węgla w wydychanym powietrzu uzyskano wyższe średnio o 50 ppm wartości stężenia w analizowanych punktach pomieszczenia. Dla udziału pomniejszonego o 10 % otrzymano wartości mniejsze średnio o 50 ppm. Na rysunku 5.23 przedstawiono obliczone przebiegi stężenia CO₂ dla dwóch monitorów (1) pod sufitem i (3) na podłodze. Na rysunku naniesiono również krzywe pomiarowe stężenia CO₂ w tych punktach.

Zwiększenie masowego udziału CO₂ w wydychanym powietrzu zmniejszyło różnicę pomiędzy wartościami stężenia obliczonymi numerycznie i zmierzonymi. Po 3 godzinach obliczone stężenia są jednak nieznacznie wyższe od wartości pomiarowych (maksymalnie o 20 ppm dla czterech porównywanych monitorów). Uzyskane wyniki pokazują, że założona w obliczeniach emisja ditlenku węgla nie odpowiadała rzeczywistej ilości wydychanego CO₂. Niedoszacowanie ilości wydychanego ditlenku węgla jest jednak mniejsze niż 10% wartości założonej. Zwiększenie udziału ditlenku węgla w wydychanym powietrzu spowodowało jednak gorsze dopasowanie krzywych dla początkowego odcinka pomiarów. Bardziej odpowiednie wydaje się zamodelowanie źródła emisji ditlenku węgla w taki sposób aby uwzględnić początkową wyższą emisję CO₂.

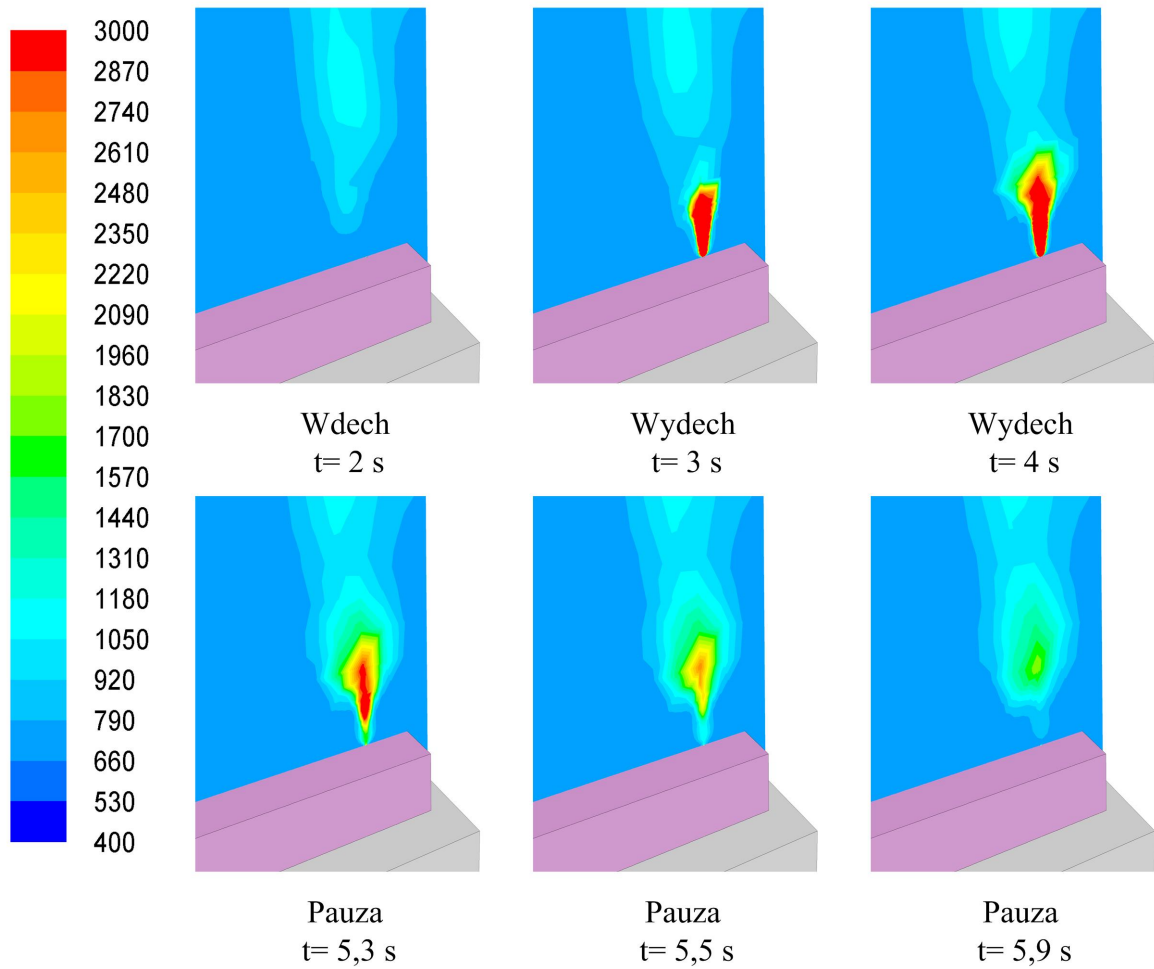
5.3.4.4 Wpływ zastosowanego modelu oddychania

W celu uwzględnienia wpływu wykorzystywanego w obliczeniach modelu oddychania porównano wyniki obliczeń dla dwóch modeli oddychającego człowieka: modelu uproszczonego

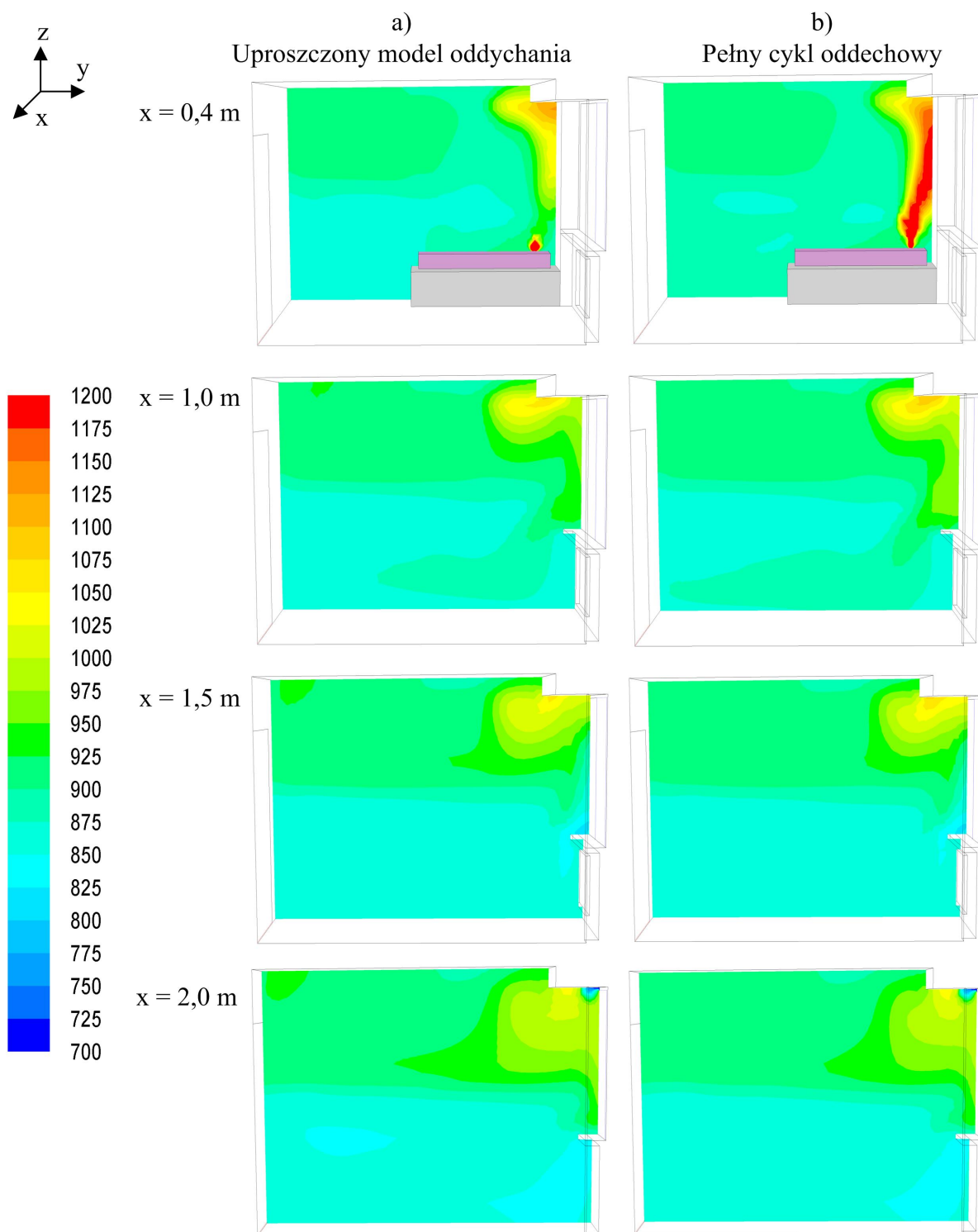


Rysunek 5.23: Przebiegi stężenia ditlenku węgla przy zmianie udziału masowego ditlenku węgla w wydychanym powietrzu dla pomiarów oraz dla dwóch wybranych monitorów 1 i 3.

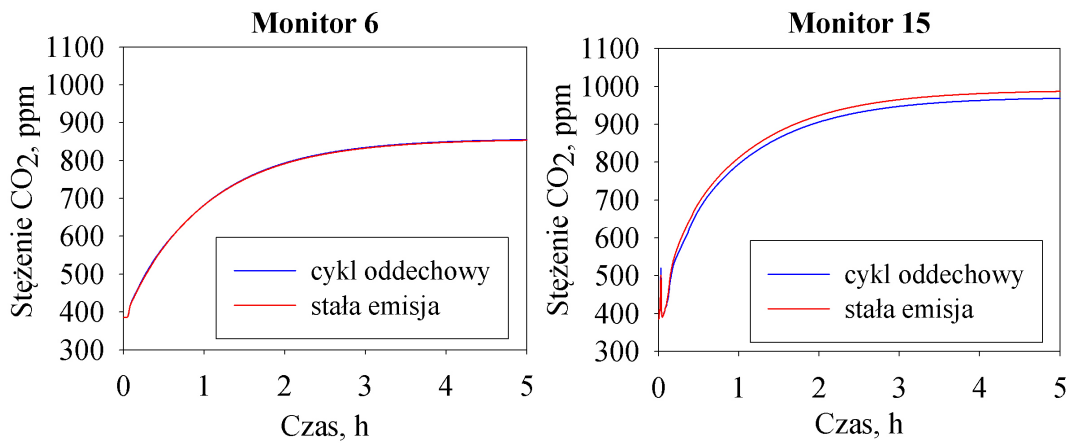
do ciągłego wydechu i modelu z pełnym cyklem oddechowym (przypadek 2,3 wg tablicy 5.8). Na rysunku 5.24 przedstawiono profile stężenia ditlenku węgla wokół ust w kolejnych fazach pojedynczego cyklu oddechowego. Model z pełnym cyklem oddechowym charakteryzuje się większą chwilową prędkością wydychanego powietrza 1,85 m/s w porównaniu ze stałą prędkością 0,77 m/s wdychanego powietrza w modelu uproszczonym. Dlatego wyższe stężenia CO₂ występują w wyższych partiach pomieszczenia w modelu z pełnym cyklem oddechowym (rysunek 5.25). Chwilowe zmiany emisji ditlenku węgla nie wpłynęły jednak na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla. Nieznaczne różnice stężeń pojawiają się nad człowiekiem oraz przy ścianie na której znajduje się łóżko. Różnice te zanikają z wysokością i odległością od człowieka. Uzyskano prawie identyczne przebiegi stężenia ditlenku węgla dla 15 analizowanych monitorów na przestrzeni pięciogodzinnych okresów czasu (współrzędne rozmieszczenia monitorów w pomieszczeniu podano na rysunku 5.11). Na rysunku 5.26 przedstawiono przykładowe przebiegi stężenia ditlenku węgla w dwóch wybranych punktach pomieszczenia (monitor 6 i 15). Największą różnicę 18 ppm uzyskano dla monitora 15 umieszczonego obok śpiącego człowieka na wysokości 1,5 m. W pozostałych punktach różnice stężenia nie przekroczyły 6 ppm. Na rysunku 5.27 przedstawiono również mapy prędkości dla dwóch przekroji $x = 0,4$ m (przekrój przez usta oddychającego człowieka) i dla $x = 1,5$ m po pięciu godzinach obliczeń. Zastosowanie dokładnego modelu oddychania nie wpływa na profile prędkości w badanym pomieszczeniu. Dla obydwu modeli oddychającego człowieka uzyskano bardzo podobne wyniki obliczeń numerycznych.



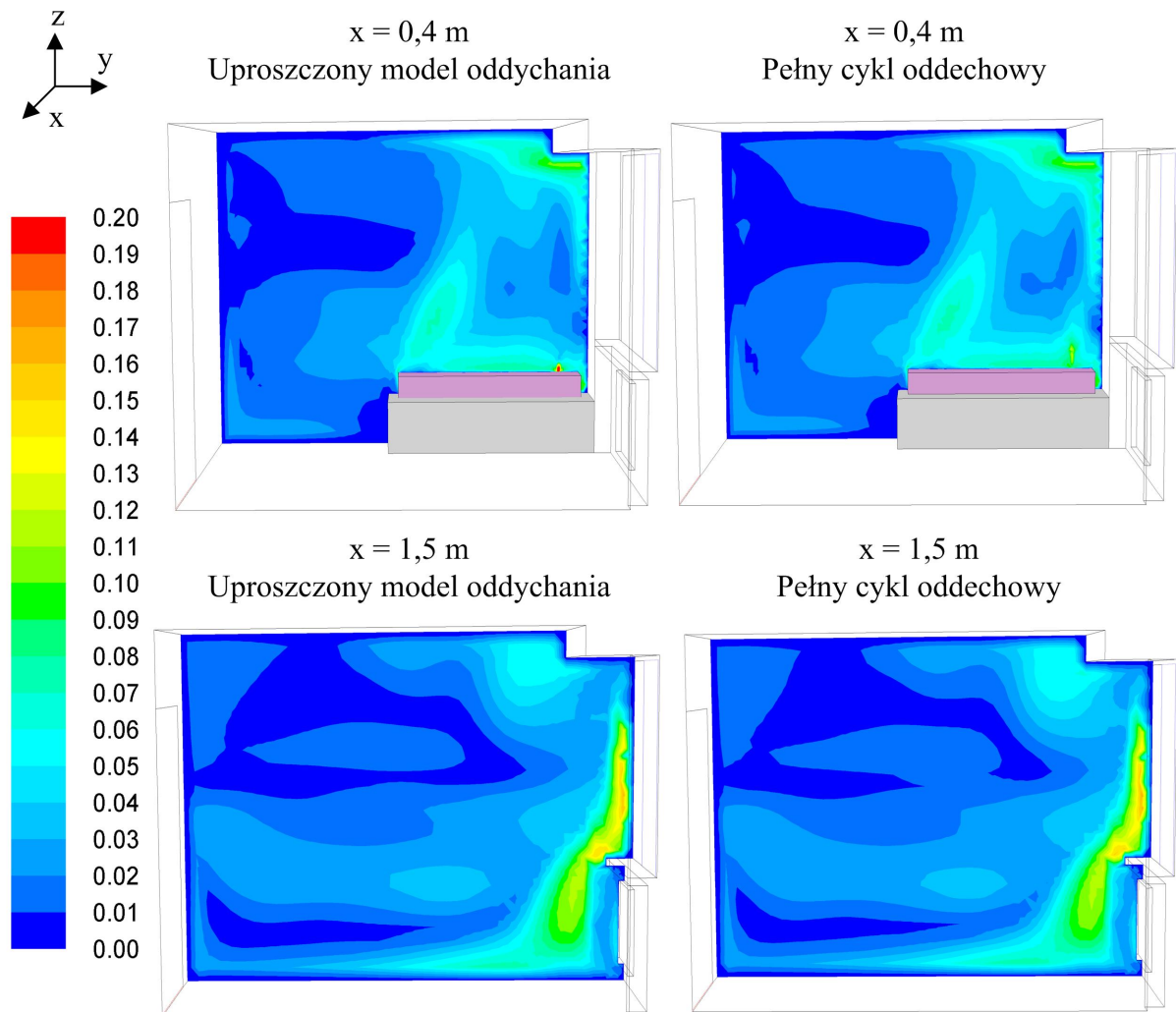
Rysunek 5.24: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) wokół ust dla jednego cyklu oddechowego po 1h obliczeń (cykl oddechowy 3624 s - 3630 s)



Rysunek 5.25: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi x po 5h obliczeń dla dwóch przypadków a) z uproszczonym modelem oddychania do ciągłego wydechu, b) z pełnym cyklem oddechowym



Rysunek 5.26: Przebiegi stężenie ditlenku węgla dla przypadku z ciągłym wydechem i pełnym cyklem oddechowym dla monitorów 6 i 15



Rysunek 5.27: Mapy prędkości (m/s) w płaszczyźnie $x = 0,4 \text{ m}$ oraz $x = 1,5 \text{ m}$ dla uproszczonego modelu oddychania i modelu z pełnym cyklem oddechowym (faza oddechu - pauza)

5.3.4.5 Wpływ gorącej powierzchni grzejnika

W okresie zimowym wpływ na ruch powietrza w pomieszczeniu mają włączone grzejniki centralnego ogrzewania. Powietrze stykając się z gorącą powierzchnią grzejnika ulega ogrzaniu i jest unoszone do góry. Od zimnej powierzchni okna powietrze ochładza się i opada w dół. W ten sposób powstają prądy konwekcyjne, które kształtują w pewnym stopniu przepływ powietrza w pomieszczeniu. Wpływa to również na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla wydychanego przez człowieka.

W związku z tym porównano dwa przypadki rozprzestrzeniania się CO_2 z wyłączonym i włączonym grzejnikiem w pomieszczeniu (przypadek 2 i 5 wg tablicy 5.8). Dla przypadku z włączonym grzejnikiem założono temperaturę powierzchni grzejnika 60°C .

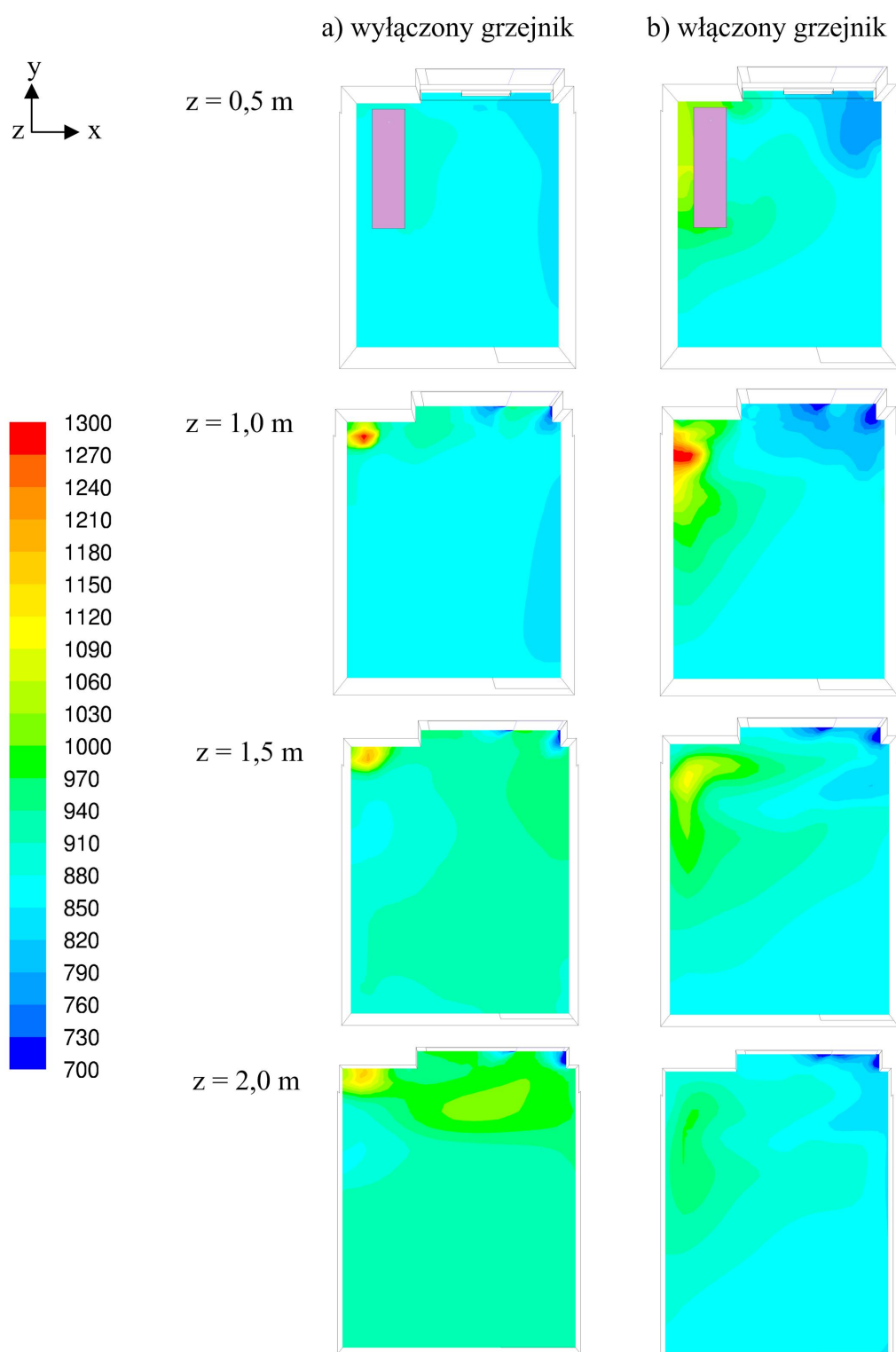
Na rysunku 5.28 przedstawiono mapy stężenia ditlenku węgla po 5 godzinach w płaszczyźnie poziomej na czterech wysokościach. W pomieszczeniu z włączonym grzejnikiem wysokie stężenia CO_2 utrzymują się nad człowiekiem oraz wokół łóżka. Wydychane powietrze o wysokim stężeniu ditlenku węgla powoli się unosi i rozprzestrzenia we wszystkich kierunkach ulegając rozcieńczaniu wraz z wysokością. Obrazują to linie prądu wydychanego przez człowieka powietrza pokolorowane stężeniem ditlenku węgla przedstawione na rysunku 5.29b. Przy wyłączonym grzejniku powietrze wydychane przez człowieka charakteryzuje silny strumień konwekcyjny wynikający z dużej różnicy temperatur powietrza wydychanego i powietrza w pomieszczeniu. Wydychany ditlenek węgla unoszony jest pod sufit pomieszczenia, następnie przepływa (jest zasysany) w kierunku okna a dalej rozprzestrzenia się po całym pokoju (rysunek 5.29a). Przy wyłączonym grzejniku w pomieszczeniu występuje większa stratyfikacja stężenie ditlenku węgla. Dla przypadku z włączonym grzejnikiem uzyskano bardziej jednorodne pole stężenia ditlenku węgla wynikające z lepszego mieszania powietrza.

Mapy prędkości w dwóch płaszczyznach pionowych przedstawiono na rysunku 5.30. Pokazują one wzrost prędkości w obszarze wokół człowieka oraz okna i grzejnika. Przy wyłączonym grzejniku prędkość powietrza wzrasta poniżej linii okna natomiast dla przypadku z włączonym grzejnikiem na skutek mieszania się zimnych i gorących mas powietrza prędkość wzrasta nad grzejnikiem.

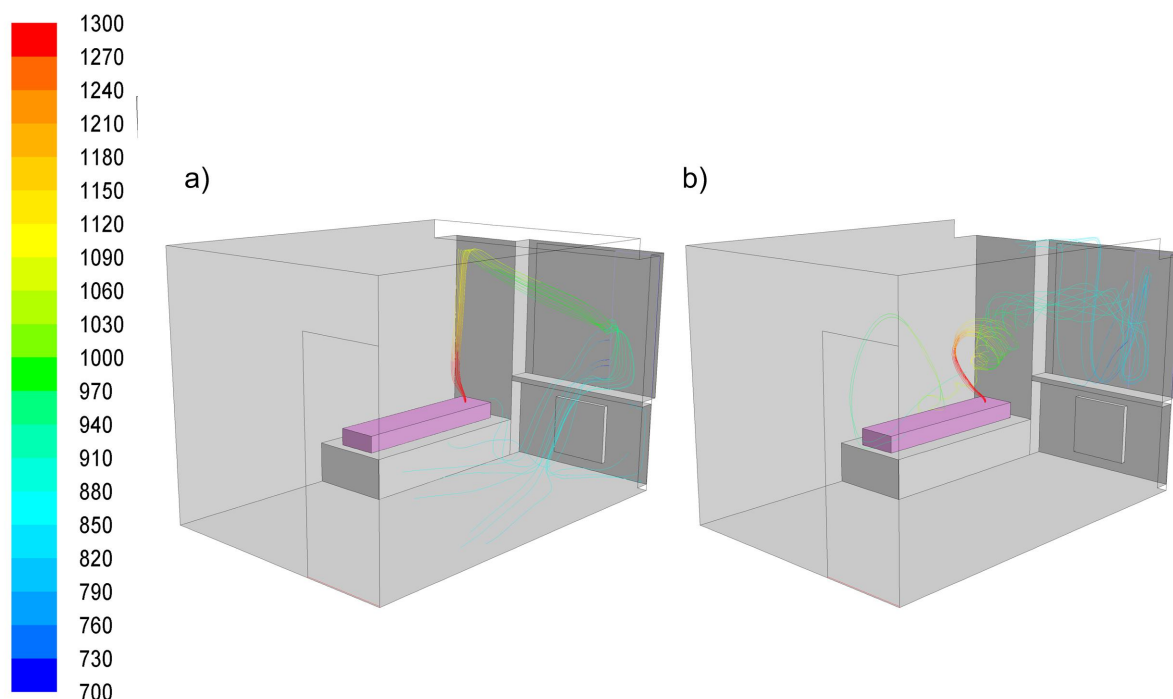
Pomimo lokalnych większych różnic stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu różnica dla średniego masowego stężenia w pomieszczeniu dla obydwu przypadków nie przekroczyła 17 ppm (rysunek 5.31). Wartości stężenia CO_2 wyższe od średniego uzyskano na wysokościach powyżej 1,5 m dla przypadku z wyłączonym grzejnikiem oraz na wysokościach do 1,5 m przypadku z włączonym grzejnikiem.

5.3.4.6 Wpływ przyjętej geometrii otworu nawiewnego

Jednym z czynników wpływającym na wyniki obliczeń numerycznych jest sposób odwzorowania geometrii pomieszczenia. Szczegółne znaczenie ma geometria szczeliny nawiewnej. W rzeczywistych warunkach najczęściej mamy do czynienia z przewietrzaniem przez mikroszczelinę w uchylnym skrzydle okna tzw. mikrowentylacja. Znaczące uproszczenie geometrii



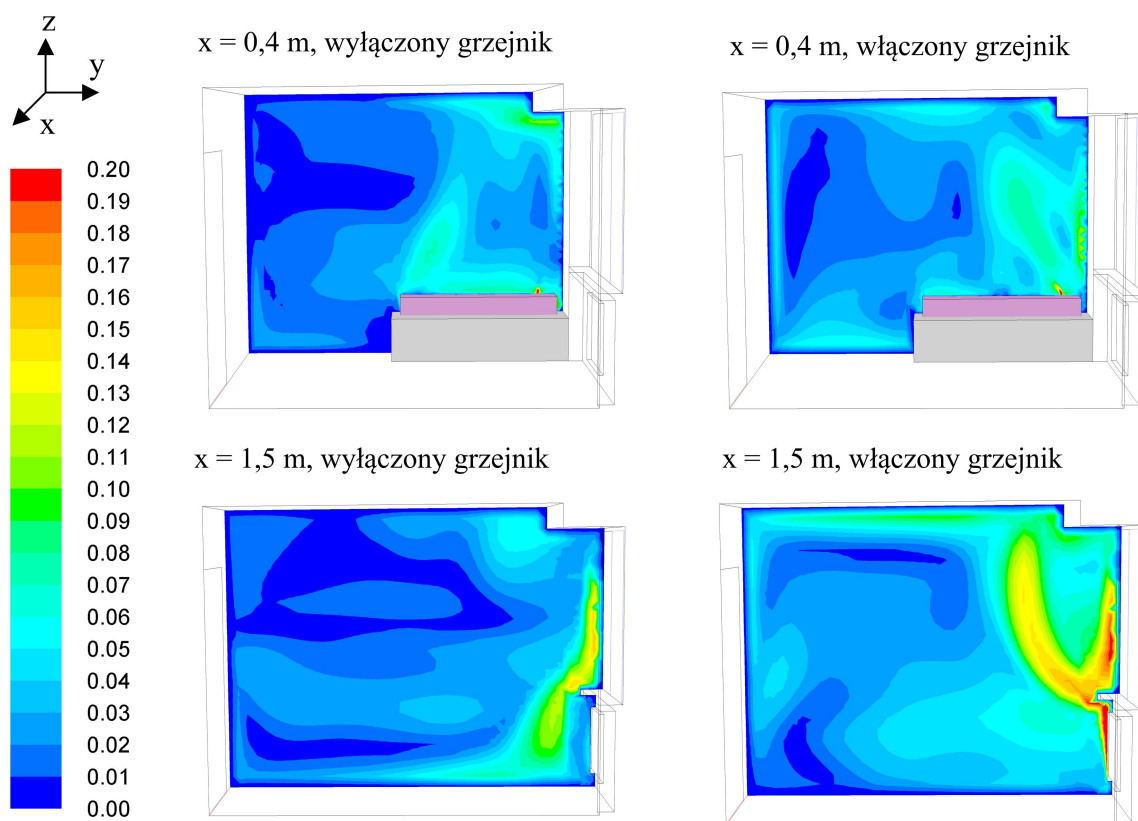
Rysunek 5.28: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) na 4 wysokościach po 5h dla dwóch przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem, b) z włączonym grzejnikiem



Rysunek 5.29: Droga przepływu wydychanego przez człowieka powietrza pokolorowana stężeniem ditlenku węgla dla dwóch przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem, b) z włączonym grzejnikiem

szczeliny nawiewnej prowadzi do zmiany pola prędkości wokół szczeliny, co może wpływać na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu.

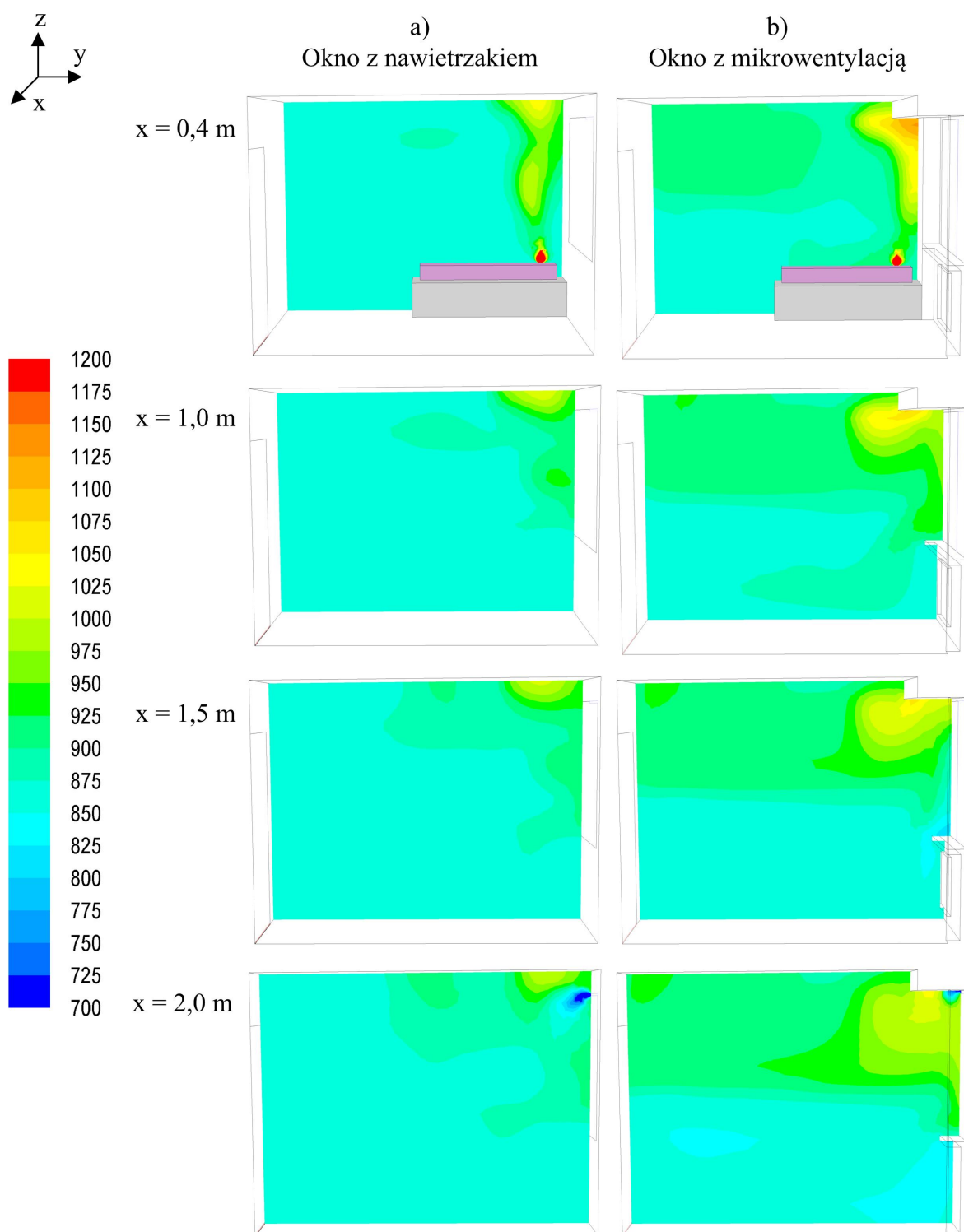
Porównano wyniki obliczeń dla dwóch przypadków z uproszczoną i dokładną geometrią pomieszczenia. W pierwszym przypadku powietrze nawiewane jest do pomieszczenia w górnej części okna przez kratkę nawiewną z tzw. nawietrzakiem. W drugim przypadku nawiew powietrza odbywa się przez okno z mikrowentylacją (przypadek 4 i 2 wg tablicy 5.8). Przyjęto jednakowe pola powierzchni obydwu otworów. Na rysunku 5.32 przedstawiono mapy stężenia ditlenku węgla w płaszczyźnie pionowej po 5 godzinach dla obydwu przypadków. Zaobserwowano wpływ przyjętego kształtu otworu nawiewnego na rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu. W przypadku okna z mikrowentylacją prędkość nawiewanego powietrza bardzo szybko maleje, co spowalnia zjawisko mieszania się powietrza w pomieszczeniu (rysunek 5.33). Powoduje to większą stratyfikację ditlenku węgla w pomieszczeniu niż dla przypadku okna z nawietrzakiem. Zastosowanie nawietrzaka powoduje lepsze mieszanie powietrza w pomieszczeniu. Znaczące różnice stężenia CO_2 dla obydwu badanych przypadków pojawiają się na wysokościach powyżej 1,5 m, obrazują to wykresy stężenia dla monitora 14 umieszczonego obok łóżka na wysokości 1,5 m i monitora 12 umieszczonego pod sufitem blisko drzwi na wysokości 2,0 m (rysunek 5.34). Wyższe stężenia zaobserwowano dla przypadku okna z mikrowentylacją.



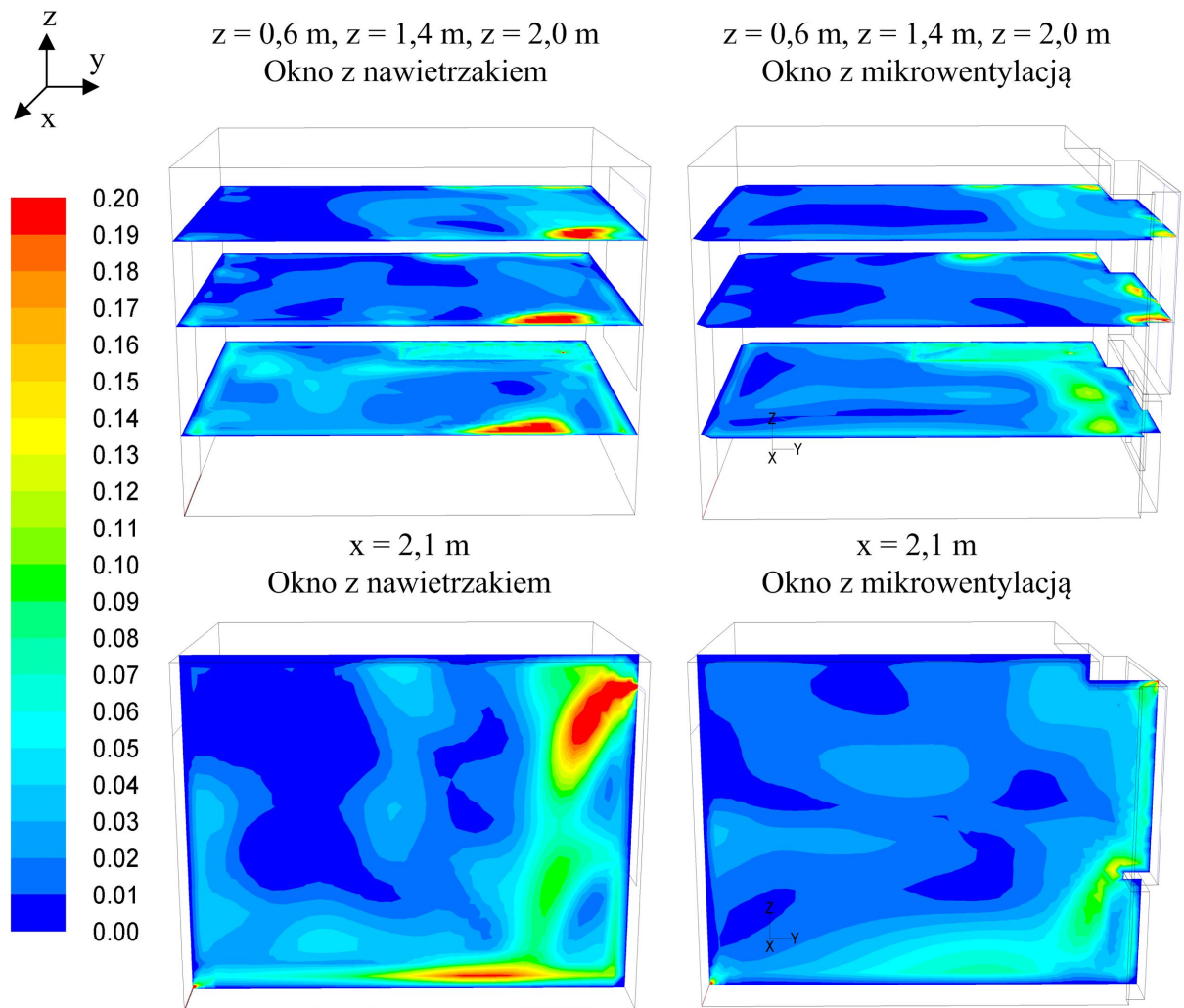
Rysunek 5.30: Mapy prędkości (m/s) w płaszczyźnie $x = 0,4$ m oraz $x = 1,5$ m dla obliczeń z wyłączonym grzejnikiem i z włączonym grzejnikiem



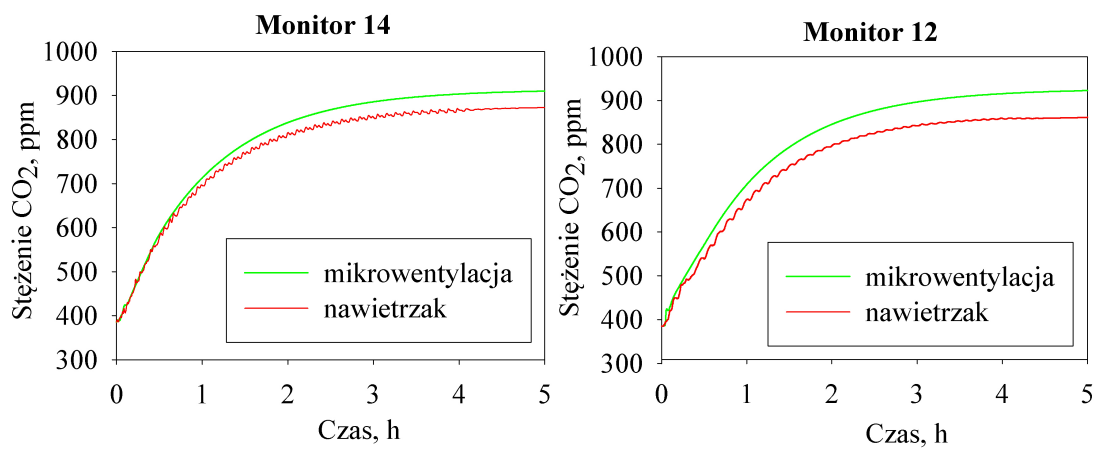
Rysunek 5.31: Średnie stężenie masowe ditlenku węgla w pomieszczeniu z włączonym i wyłączonym grzejnikiem



Rysunek 5.32: Mapy stężenia ditlenku węgla (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi x dla dwóch przypadków a) okna z nawietrzakiem, b) okna z mikrowentylacją



Rysunek 5.33: Mapy prędkości (m/s) w płaszczyźnie prostopadłej do osi z na wysokości 0,6 m, 1,4 m i 2,0 m dla okna z nawietrzakiem i okna z mikrowentylacją



Rysunek 5.34: Przebiegi stężenia ditlenku węgla (ppm) dla dwóch monitorów 12 i 14 dla okna z nawietrzakiem i okna z mikrowentylacją

5.3.5 Poszukiwanie reprezentatywnych obszarów dla pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu

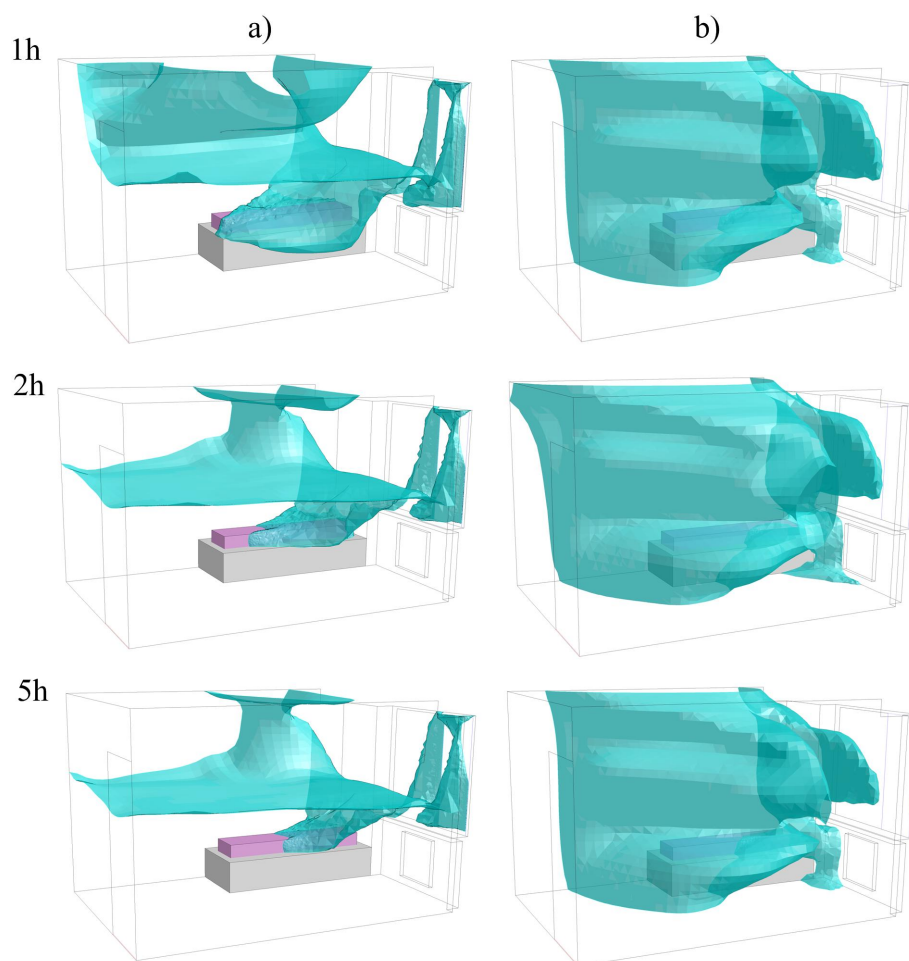
Dla wyznaczenia liczby wymian powietrza w pomieszczeniu ważne jest aby miejsce pomiaru było reprezentatywne dla średniego stężenia CO₂ w pomieszczeniu. Wynika to z budowy modelu matematycznego, który zakłada jednorodne stężenie ditlenku węgla w całym pomieszczeniu i przyjmuje do obliczeń tylko jedną wartość stężenia CO₂ zmierzonego w pomieszczeniu. Reprezentatywne obszary pomiaru stężenia ditlenku węgla wyznaczono w oparciu o wyniki modelowania numerycznego w pomieszczeniu z oddychającym człowiekiem dla dwóch wariantów przy włączonym i wyłączonym grzejniku. Podstawą poszukiwania obszaru reprezentatywnego jest wyznaczenie rozkładu stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. W tablicy 5.9 przedstawiono wartości obliczonego modelem numerycznym średniego stężenia CO₂ w pomieszczeniu po czasie 1 do 5 godzin. Wartości te porównano z wynikami obliczeń w modelu jednostrefowym oraz z wynikami pomiarów. Różnice pomiędzy stężeniem obliczonym w modelu numerycznym a wartościami obliczonymi w modelu jednostrefowym nie przekraczają 10 ppm, natomiast dla pomiarów nie przekraczają one 41 ppm. Na rysunku 5.35 przedstawiono powierzchnie odpowiadające średniemu stężeniu ditlenku węgla w pomieszczeniu po czasie 1, 2 i 5 godzin. Powierzchnia średniego stężenia ditlenku węgla zmieniają się w niewielkim stopniu w czasie przy czym większe zmiany występują jedynie w pierwszych dwóch godzinach analizowanego przedziału czasu.

Tablica 5.9: Średnie stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu, ppm

Przypadek	1h	2h	3h	4h	5h
Wyłączony grzejnik	710	829	874	890	896
Włączony grzejnik	720	832	869	881	885
Model I-strefowy	720	832	878	893	898
Pomiary	769	870	904	-	-

Ponieważ pomiar stężenia CO₂ oraz wyniki obliczeń numerycznych obarczone są błędem, określając reprezentatywny obszar dla pomiaru stężenia CO₂ w pomieszczeniu należy przyjąć pewną tolerancję zakresu zmian stężenia ditlenku węgla w obrębie obszaru reprezentatywnego. Przeanalizowano trzy przedziały tolerancji zmian stężenia ditlenku węgla wokół wartości średniej stężenia w pomieszczeniu:

- **Przedział I**, $\pm 10\%$ wartości średniej stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Przedział ten określają normy [42, 43] jako dopuszczalny dla wahań stężenia gazu znacznikowego w obrębie jednej strefy,
- **Przedział II**, \pm dokładność pomiarową czujników ditlenku węgla. Dokładność pomiarowa czujników CO₂ wykorzystywanych w pomiarach wynosiła $20 \text{ ppm} \pm 3\%$ wskazania,



Rysunek 5.35: Izo-powierzchnie średniego stężenia CO₂ (ppm) w pomieszczeniu dla przypadku a) z wyłączonym grzejnikiem, b) w włączonym grzejnikiem dla kolejnych godzin obliczeń

- **Przedział III**, ± 20 ppm, minimalna wartość oszacowania błędu pomiarowego.

W tabelicy 5.10 przedstawiono zakresy tolerancji stężenia CO₂ dla pierwszych 5 godzin wynikające z przyjętych przedziałów. Zakresy te nieznacznie różnią się dla przypadku z wyłączonym i włączonym grzejnikiem.

Poszukując reprezentatywnych obszarów pomiaru CO₂ w każdym przedziale opracowano mapy stężenia ditlenku węgla w płaszczyznach poziomych na wybranych wysokościach w pomieszczeniu (co 10 cm) w kolejnych godzinach. Na rysunku 5.36 przedstawiono przykładowo reprezentatywne obszary średniego stężenia CO₂ (oznaczone kolorem zielonym) dla przyjętej tolerancji w przedziale I na trzech wyróżnionych wysokościach $z=0,6$ m, $z=1,2$ m, $z=2,0$ dla kolejnych godzin. Poza obszarem reprezentatywnym zaznaczono obszary dla stężeń poniżej zakresu tolerancji (kolor niebieski), oraz dla stężeń powyżej zakresu tolerancji (kolor czerwony). Analizując mapy stężenia ditlenku węgla na różnych wysokościach pomieszczenia zaobserwowano niewielkie zmiany powierzchni obszaru reprezentatywnego (kolor zielony) w kolejnych godzinach. Obszar reprezentatywny zajmuje najmniejszą powierzchnię po pięciu godzinach dla

Tablica 5.10: Przyjęty zakres tolerancji stężenia CO₂

Czas, h	Grzejnik	Średnie stężenie, ppm	Zakres tolerancji stężenia CO ₂ , ppm		
			Przedział I	Przedział II	Przedział III
1h	Wyłączony	710	71	41	20
	Włączony	720	72	42	20
2h	Wyłączony	829	83	45	20
	Włączony	832	83	45	20
3h	Wyłączony	874	87	46	20
	Włączony	869	87	46	20
4h	Wyłączony	890	89	47	20
	Włączony	881	89	47	20
5h	Wyłączony	896	90	47	20
	Włączony	885	89	47	20

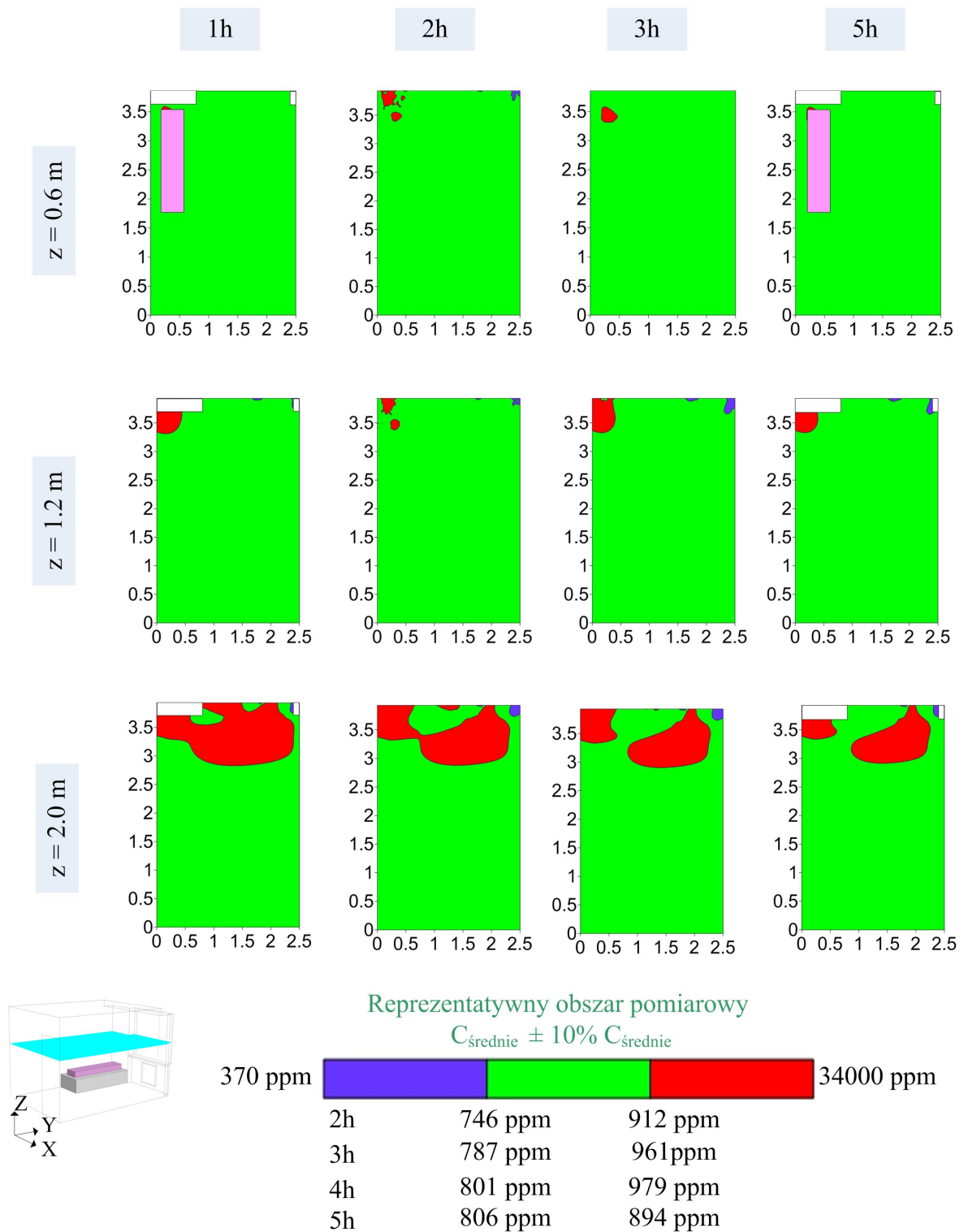
wszystkich trzech analizowanych przedziałów.

Identyfikację obszaru reprezentatywnego wspólnego dla wszystkich analizowanych wysokości przeprowadzono dla wyników obliczeń numerycznych po piątej godzinie.

Identyfikacja reprezentatywnego obszaru pomiarów CO₂ dla przyjętego zakresu tolerancji w przedziale I

Na rysunku 5.37 przedstawiono przykładowo reprezentatywne obszary średniego stężenia CO₂ (oznaczone kolorem zielonym) dla przyjętej tolerancji w przedziale I na trzech wyróżnionych wysokościach $z=0,6$ m, $z=1,2$ m, $z=2,0$ m przy wyłączonym i włączonym grzejniku. Na wszystkich analizowanych wysokościach obszar reprezentatywny obejmuje znaczną część przekroju pomieszczenia. Stężenia CO₂ powyżej zakresu przyjętego dla obszaru reprezentatywnego występują jedynie nad łóżkiem oraz w pobliżu okna i grzejnika przy czym dla włączonego grzejnika występują w okolicy łóżka na wysokościach od 0,6 m do 1,5 m, natomiast przy wyłączonym grzejniku w okolicach łóżka i okna na wysokości od 1,5 do 2,2 m. Stężenia poniżej zakresu tolerancji występują jedynie w okolicach szczeliny nawiewnej dla obydwu analizowanych przypadków. Lokalizacja reprezentatywnych obszarów pomiaru stężenia CO₂ niewiele zmienia się w kolejnych godzinach przy czym z upływem czasu jego powierzchnia maleje.

Wykorzystując wyniki identyfikacji reprezentatywnego obszaru dla pomiarów CO₂ w analizowanych płaszczyznach poziomych opracowano obszar przestrzenny, którego rzut na płaszczyznę podłogi pomieszczenia przedstawiono na rysunku 5.38. Obejmuje on ponad połowę objętości pomieszczenia z wyłączeniem obszaru nad łóżkiem (na całej wysokości) i obszaru wokół źródła wydychanego ditlenku węgla (w promieniu 1 m od źródła) oraz obszaru wokół okna i grzejnika (w odległości około 1,5 m na całej wysokości pomieszczenia).



Rysunek 5.36: Mapy stężenie CO₂ (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi z dla przyjętej tolerancji w przedziale I dla kolejnych godzin

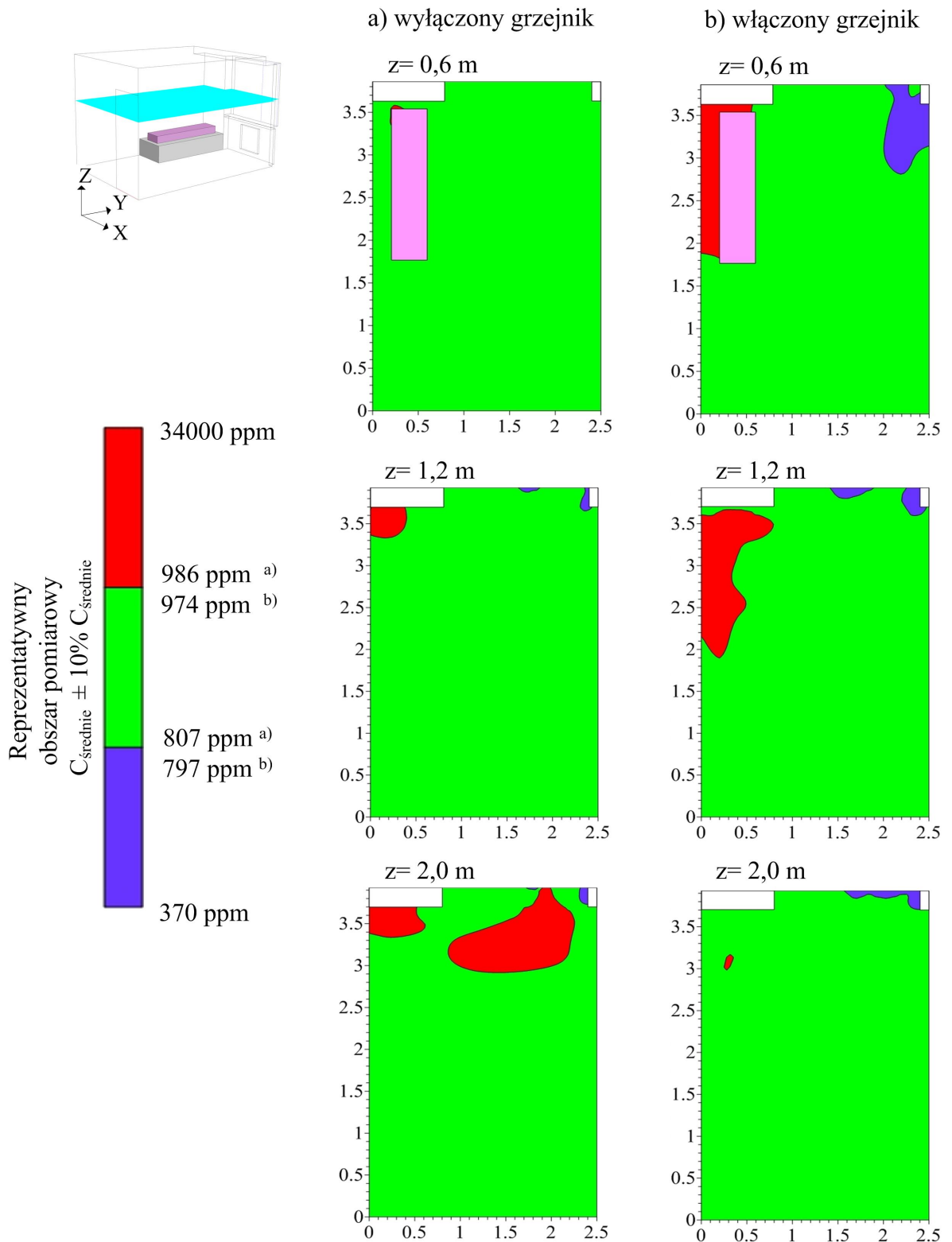
Identyfikacja reprezentatywnego obszaru pomiarów CO₂ dla przyjętego zakresu tolerancji w przedziale II

Wykorzystując wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych wyznaczono reprezentatywny obszar dla pomiarów stężenia CO₂ w przedziale tolerancji II. Na rysunku 5.39 przedstawiono reprezentatywne obszary średniego stężenia CO₂ (kolor zielony) na trzech przykładowych wysokościach pomieszczenia $z=0,6$ m, $z=1,2$ m, $z=2,0$ m przy wyłączonym i włączonym grzejniku. Obszary reprezentatywne dla pomiaru stężenia CO₂ mają mniejszy zasięg niż obszary uzyskane w wyniku przyjęcia tolerancji w przedziale I. Stężenia poniżej i powyżej obszaru reprezentatywnego zajmują dużo większą przestrzeń wokół okna i nad człowiekiem. Stężenia poniżej obszaru reprezentatywnego pojawiają się również wzdłuż ściany przylegającej do okna.

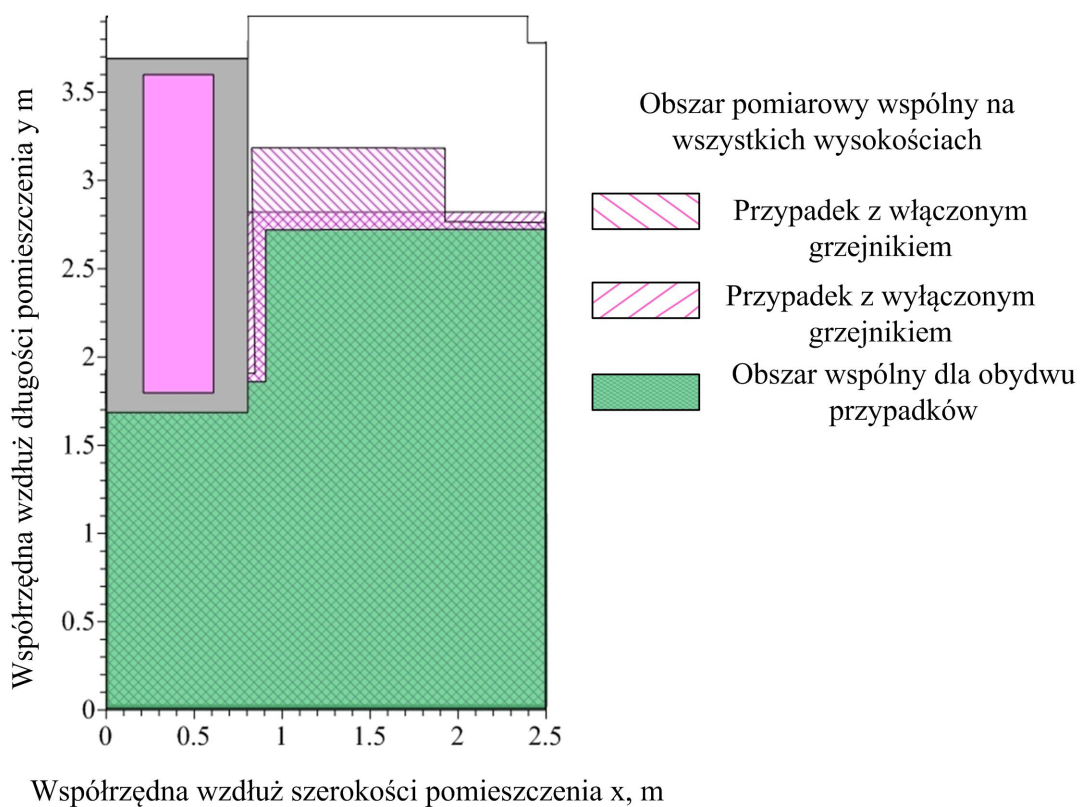
Na podstawie identyfikacji reprezentatywnych obszarów dla pomiarów CO₂ w różnych płaszczyznach opracowano wspólny obszar przestrzenny w przedziale tolerancji II (rysunek 5.40). Obszar ten jest węższy od obszaru wyznaczonego dla przedziału I o obszar występujący bezpośrednio przy ścianach (około 40 cm od ścian). Dotyczy to szczególnie ściany przeciwległej do łóżka (wzdłuż głównej drogi przepływu powietrza w pomieszczeniu od okna do drzwi).

Identyfikacja reprezentatywnego obszaru pomiarów CO₂ dla przyjętego zakresu tolerancji w przedziale III

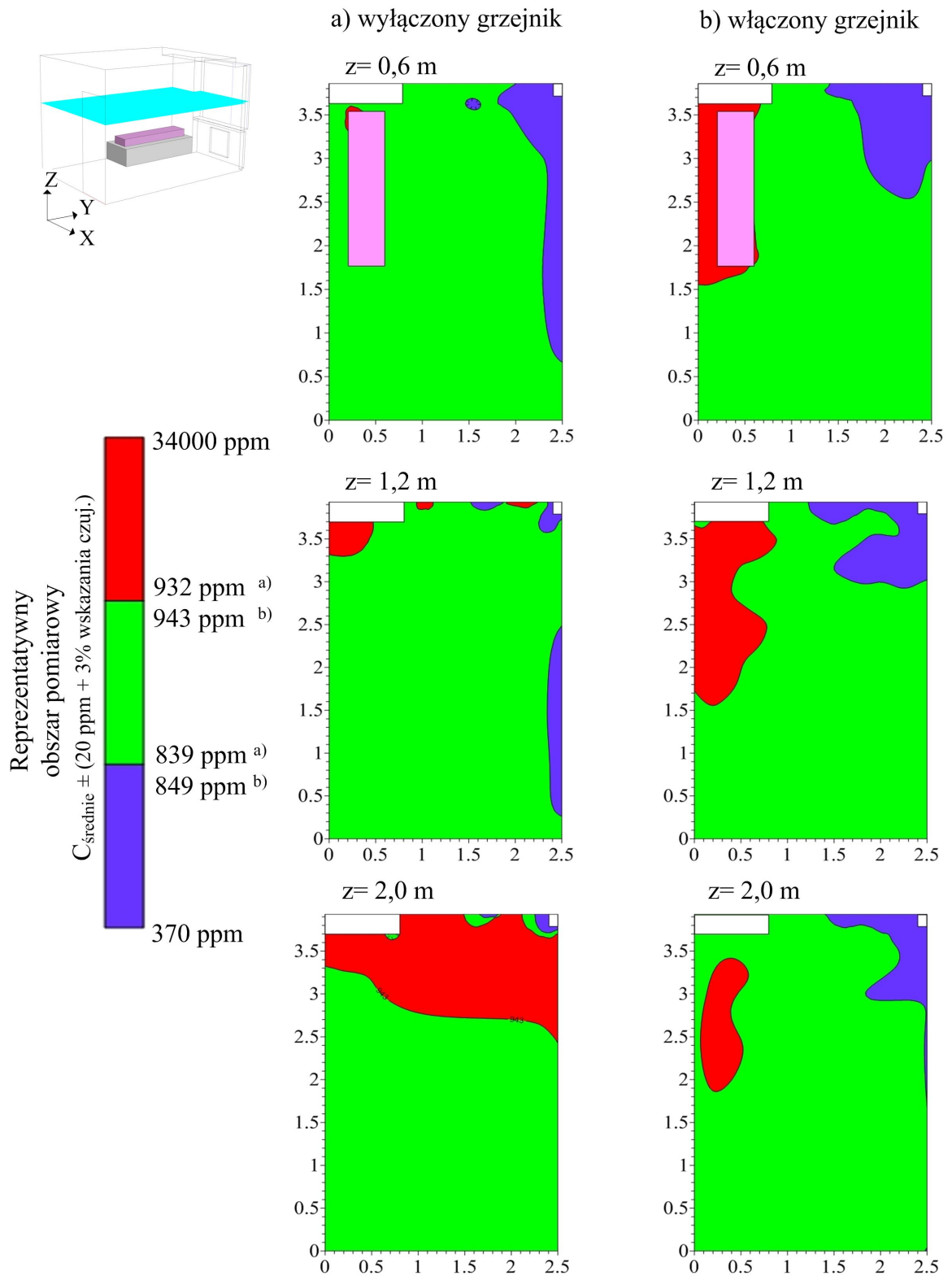
Na rysunku 5.41 przedstawiono reprezentatywne obszary średniego stężenia CO₂ (oznaczone kolorem zielonym) dla przyjętej tolerancji stężenia w przedziale III na trzech przykładowych wysokościach pomieszczenia $z=0,6$ m, $z=1,2$ m, $z=2,0$ m przy wyłączonym i włączonym grzejniku. W tym przypadku obszary reprezentatywne zajmują jeszcze mniejszą powierzchnię. Stężenia poniżej obszaru reprezentatywnego występują w dolnych partiach pomieszczenia dla przypadku z wyłączonym grzejnikiem oraz wokół okna i w pobliżu drzwi przy włączonym grzejniku. Stężenia powyżej obszaru reprezentatywnego występują w górnych partiach pomieszczenia przy wyłączonym grzejniku, natomiast dla przypadku z włączonym grzejnikiem występują one nad łóżkiem ze śpiącym człowiekiem. Największy obszar reprezentatywny uzyskano w płaszczyznach na wysokościach 1,4 - 1,5 m dla przypadku z wyłączonym grzejnikiem i w płaszczyźnie na wysokości 2,2 m dla przypadku z włączonym grzejnikiem (rysunek 5.42). Obszar reprezentatywny dla pomiaru stężenia CO₂ przechodzi przez środek pomieszczenia na większości z analizowanych wysokości. Identyfikacji reprezentatywnych obszarów dla pomiarów CO₂ w płaszczyznach poziomych w przedziale III nie pozwoliła na wyznaczenie wspólnego obszaru przestrzennego.



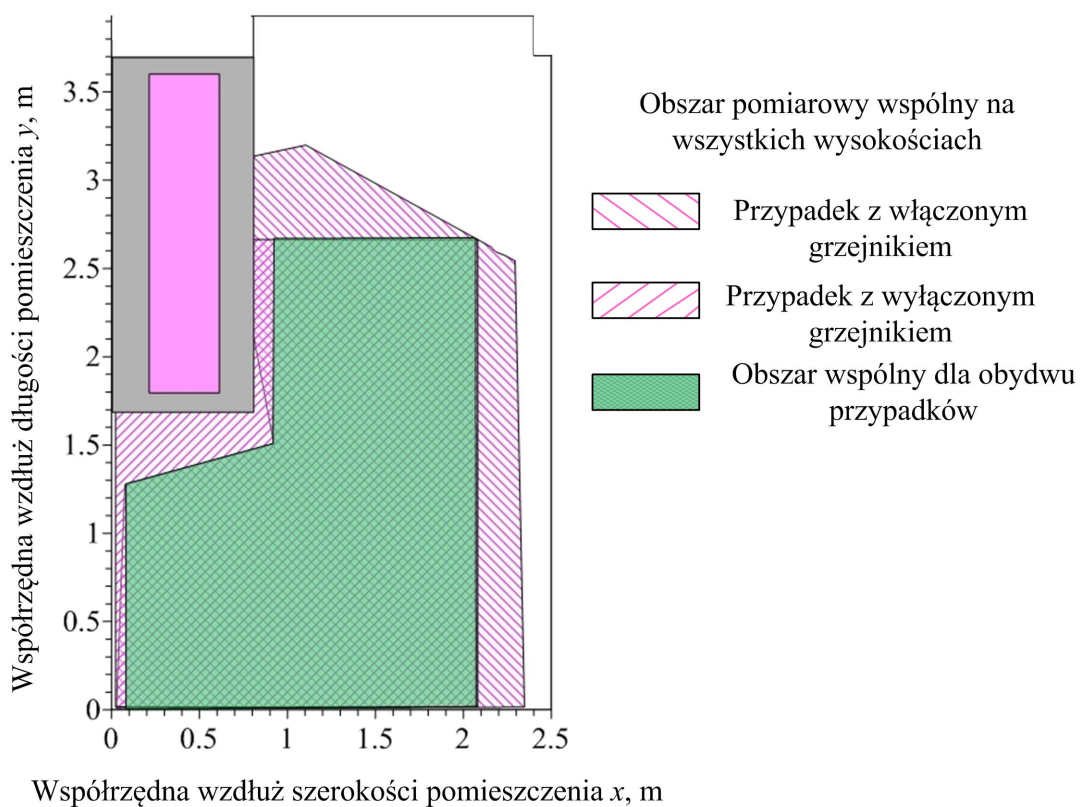
Rysunek 5.37: Mapy stężenie CO₂ (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi z dla przyjętej tolerancji w przedziale I dla przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem b) z włączonym grzejnikiem po 5 godzinach



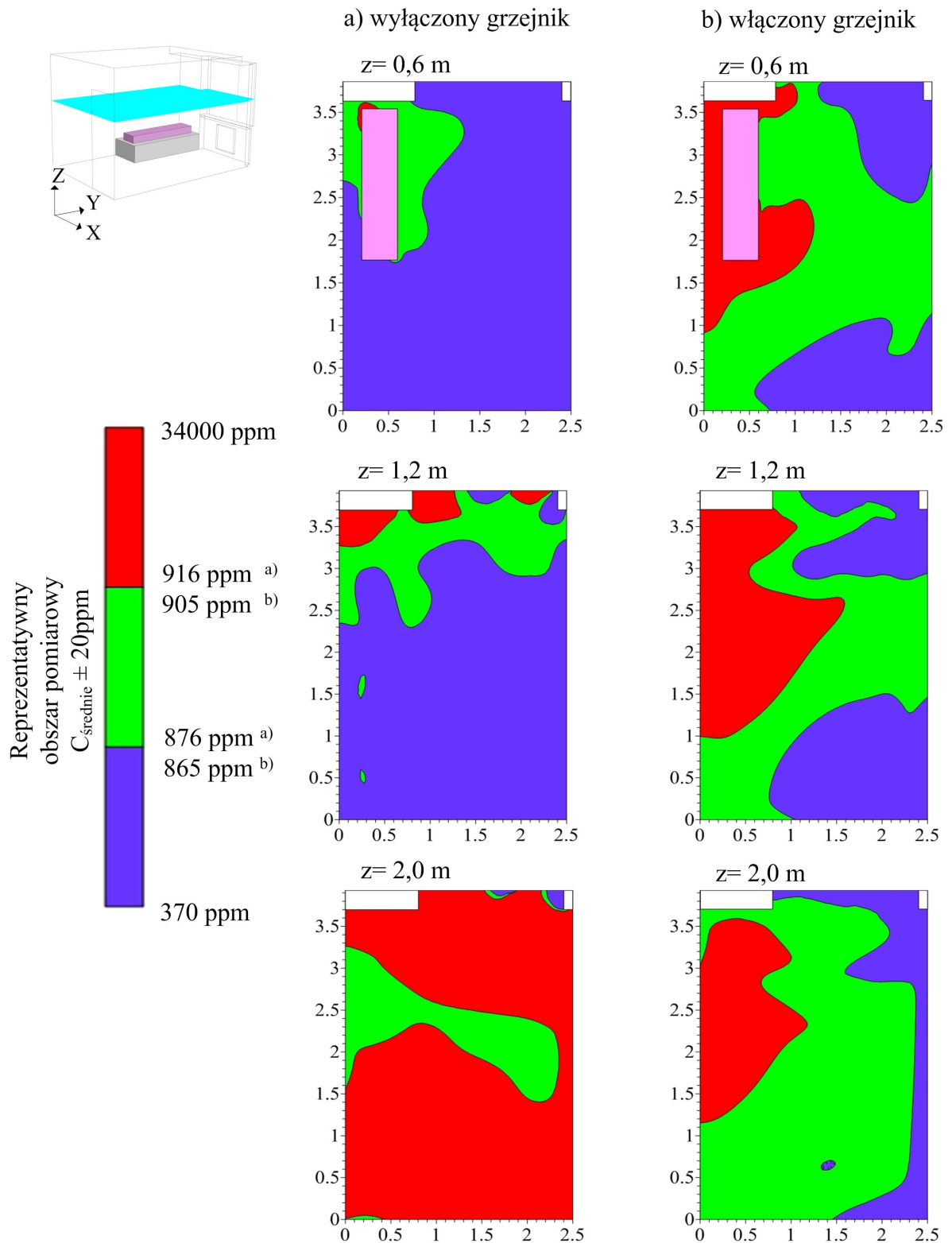
Rysunek 5.38: Wspólny obszar pomiarowy na całej wysokości pomieszczenia dla zakresu pomiarowego $\pm 10\%$ wartości średniej CO_2 w pomieszczeniu dla przypadku z wyłączonym i włączonym grzejnikiem



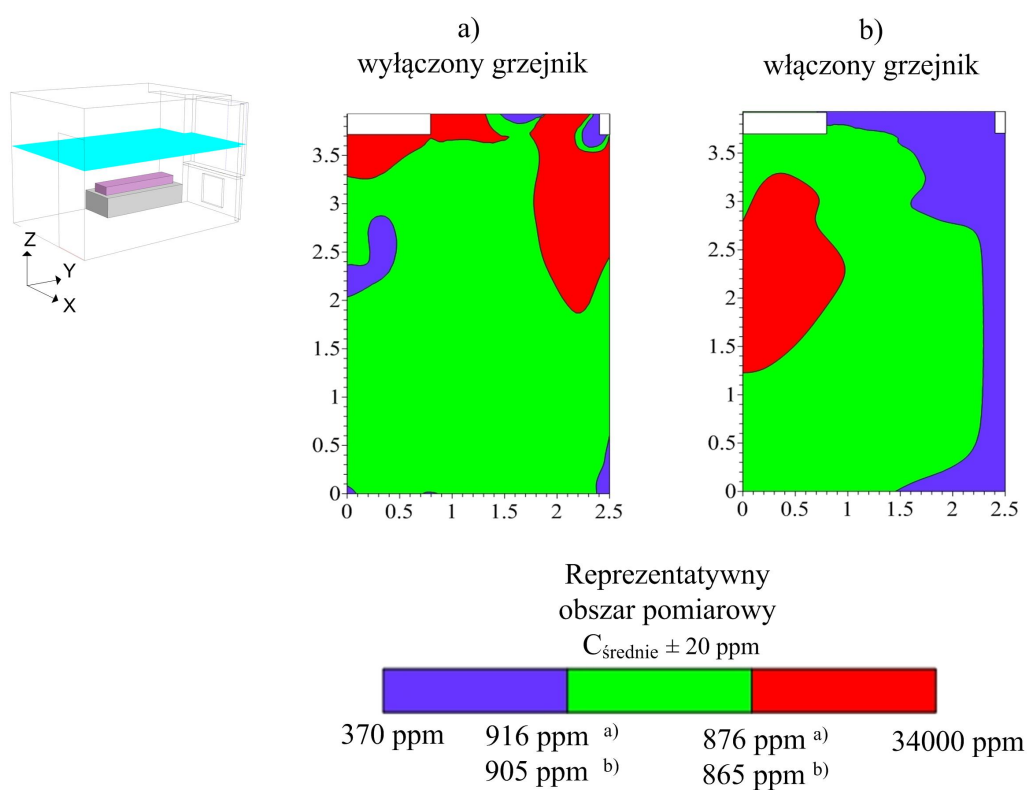
Rysunek 5.39: Mapy stężenie CO₂ (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi z dla przyjętej tolerancji w przedziale II dla przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem b) z włączonym grzejnikiem po 5 godzinach



Rysunek 5.40: Wspólny obszar pomiarowy na całej wysokości pomieszczenia dla zakresu pomiarowego obejmującego dokładność pomiarową czujników CO₂ dla przypadku a) z wyłączonym i b) z włączonym grzejnikiem



Rysunek 5.41: Mapy stężenie CO₂ (ppm) w płaszczyźnie prostopadłej do osi z dla przyjętej tolerancji w przedziale III dla przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem b) z włączonym grzejnikiem po 5 godzinach



Rysunek 5.42: Mapy maksymalnego obszaru pomiarowego dla przyjętej tolerancji w przedziale I dla przypadków a) z wyłączonym grzejnikiem na wysokości $z = 1,4 \text{ m}$ b) z włączonym grzejnikiem na wysokości $z = 2,2 \text{ m}$, po 5 godzinach

5.3.6 Wnioski do rozdziału

Wykorzystując opracowaną metodę oraz program komputerowy *Fluent* przeprowadzono wielowariantowe obliczenia numeryczne. Porównanie zmierzonych i obliczonych numerycznie czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla wykazało istnienie niewielkich różnic stężenia ditlenku węgla, które mieszczą się w granicach błędu pomiarowego czujników ditlenku węgla.

Wyniki obliczeń i przeprowadzonych analiz pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Zmiany w przyjętej do obliczeń emisji ditlenku węgla od człowieka wpływają na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla. Za względu na charakter prowadzonych pomiarów (osoba wchodzi do pomieszczenia na początku pomiarów) w obliczeniach numerycznych powinno się uwzględniać początkową wyższą emisję CO₂. Zbadania wymaga również wpływ początkowego poziomu turbulencji powietrza w pomieszczeniu na szybkość rozprzestrzeniania się ditlenku węgla.
- Obliczony rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu w niewielkim stopniu zależy od przyjętego modelu oddychania (z pełnym cyklem oddechowym lub uproszczonym do ciągłego wydychania). Wyniki obliczeń w uproszczonym modelu oddychania są wystarczająco dokładne dla potrzeb badania rozkładu stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu a czas obliczeń znacząco krótszy niż z wykorzystaniem modelu z pełnym cyklem oddechowym.
- Geometria otworu nawiewnego ma wpływ na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Dla okna z mikrowentylacją powietrze znacznie wolniej miesza się w pomieszczeniu i ulega większej stratyfikacji. W przypadku okna z nawietrzakiem uzyskano bardziej jednorodne pole stężenia ditlenku węgla.
- Obecność grzejnika generującego konwekcyjną strugę powietrza ma istotne znaczenie dla sposobu rozprzestrzeniania się generowanego metabolicznie ditlenku węgla w pomieszczeniu i dlatego powinna być uwzględniona w obliczeniach numerycznych.

Podstawowym zadaniem modelowania numerycznego było poszukiwanie reprezentatywnych miejsc pomiaru stężenia ditlenku węgla. Reprezentatywne obszary dla pomiaru stężenia wyznaczono dla trzech zakresów tolerancji stężenia CO₂ w odniesieniu do wartości średniej w pomieszczeniu. Reprezentatywny obszar dla pomiarów stężenia CO₂ przy przyjętej tolerancji w przedziale I obejmuje ponad połowę objętości pomieszczenia z wyłączeniem przestrzeni nad łóżkiem przy oknie i grzejniku. W przedziale II wymaga on zawężenia o odległość 40 cm od ścian.

Obliczenia i rozważania przeprowadzone w ramach niniejszego rozdziału pozwalają na sformułowanie ogólniejszych wniosków:

- pomiarów nie powinno się wykonywać nad źródłem emisji CO₂, z obszaru pomiarów należy wyłączyć całą objętość nad łóżkiem ze śpiącym człowiekiem,

- miejsce pomiarów powinno znajdować się z dala od powierzchni grzejnych i otworów nawiewnych w tym okien,
- odległość czujników pomiarowych od ścian powinna być większa od 40 cm,
- obszarem rekomendowanym dla pomiarów stężenia ditlenku węgla jest środek pokoju.

Uzyskane wyniki nie mogą być uogólnione na inne pomieszczenia (tj. pokój dzienny, kuchnia, łazienka) w których może występować inny przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla. Dlatego potrzebne są dalsze badania dla pomieszczeń o innej kubaturze, z innym rozmieszczeniem elementów wyposażenia w tym innym usytuowaniem łóżka ze śpiącym człowiekiem w stosunku do otworów nawiewnego i wywiewnego. Czynnikiem mogącym wpływać na rozprzestrzenianie się ditlenku węgla w pomieszczeniu jest również krotność wymian powietrza. Powinno to również stanowić przedmiot dalszych badań.

Rozdział 6

Podsumowanie i wnioski

W ramach realizacji niniejszej pracy opracowano metodę określania intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach z wykorzystaniem wyników pomiarów rozkładu czasowego stężenia generowanego metabolicznie ditlenku węgla. Opracowana metodyka umożliwia:

- określenie reprezentatywnych miejsc pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniach mieszkalnych dla obliczeń wymiany powietrza,
- obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza w opracowanym programie komputerowym w oparciu o pomiar stężenia ditlenku węgla w każdej strefie pomiarowej,
- ocenę intensywności wentylacji i jakości powietrza wewnętrznego.

Obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza w opracowanym programie wykazały jego przydatność do oceny intensywności wymiany powietrza w mieszkaniach w czasie ich normalnej eksploatacji. Program pozwala na określenie strumieni powietrza wymienianego pomiędzy strefami jak również kierunków przepływu powietrza. Empiryczna walidacja modelu potwierdziła dobrą dokładność uzyskanych rezultatów. Rozbieżności mieściły się w granicach niepewności wyznaczenia liczby wymian powietrza z pomiaru anemometrem. Dla układów wielostrefowych przeprowadzono analizę dokładności rozwiązania zadania odwrotnego. Wykazano, że dla układu dwustrefowego możliwe jest określanie dwukierunkowych przepływy powietrza pomiędzy strefami. Dla tego układu uzyskano dobre zbieżności zastosowanej procedury iteracyjnej rozwiązania zadania odwrotnego. Dla układów z większą liczbą stref nie uzyskano zbieżnego rozwiązania dla dwukierunkowych przepływów powietrza pomiędzy strefami ze względu na złe uwarunkowanie zadania odwrotnego. Dlatego dla układów powyżej trzech stref można analizować jeden kierunek przepływu powietrza pomiędzy strefami. Obliczenia takie przeprowadzono dla układu obejmującego od 3 do 6 stref. Dla większości analizowanych przypadków uzyskano wówczas zadowalające rozwiązanie. Głównym problemem przy obliczaniu międzystrefowych przepływów powietrza są wartości startowe przyjętych strumieni powietrza. Nie dla wszystkich analizowanych przypadków przyjęte wartości startowe pozwoliły na uzyskanie zbieżnego rozwiązania.

W opracowanym programie komputerowym przeprowadzono obliczenia liczby wymian powietrza w pomieszczeniu na podstawie pomiaru stężenia CO₂ w różnych punktach tego pomieszczenia. Uzyskane wyniki obliczeń wykazały istotny wpływ usytuowania czujników ditlenku węgla na wielkość obliczonej liczby wymian powietrza. Ponadto przeprowadzono obliczenia międzystrefowych przepływów powietrza w dwóch mieszkaniach: cztero i sześciostrefowym. Wyniki obliczeń wykorzystano do oceny intensywności wentylacji i jakości powietrza w badanych mieszkaniach. Obliczone wartości strumieni powietrza przepływające przez badane mieszkania świadczyły o niewystarczającej wentylacji poszczególnych pomieszczeń w szczególności sypialni. Sumaryczny strumień powietrza usuwany z każdego mieszkania jest zbyt mały w stosunku do wymagań normy [74] dla budynków z wentylacją naturalną. Określona intensywność wentylacji w badanych mieszkaniach jest zbyt mała dla zapewnienia właściwej jakości powietrza wewnętrznego jej mieszkańcom.

Dla oceny wpływu miejsca usytuowania czujnika ditlenku węgla na wyznaczoną liczbę wymian powietrza przeprowadzono obliczenia numeryczne CFD rozprzestrzeniania się wydychanego przez człowieka ditlenku węgla.

Porównanie zmierzonych i obliczonych numerycznie czasowych przebiegów stężenia ditlenku węgla wykazało istnienie niewielkich różnic, które mieszczą się w granicach błędów pomiarowych czujników ditlenku węgla. Wykazano, że istotny wpływ na obliczony rozkład rozprzestrzeniania się wydychanego ditlenku węgla w pomieszczeniu ma geometria szczeliny nawiewnej, dlatego istotne jest zachowanie podobieństwa geometrycznego dla otworów nawiewnych. Zaobserwowano istotny wpływ gorącej powierzchni grzejnika na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Wykazano również, że zastosowany model oddychania człowieka (tj. uproszczony z ciągłym wydychaniem lub z pełnym cyklem oddechowym) nie wpływa w istotny sposób na dokładność obliczeń rozprzestrzeniania się ditlenku węgla w pomieszczeniu.

Przeprowadzone obliczenia i analiza wyników pozwoliły na określenie reprezentatywnych miejsc pomiaru stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu ze śpiącym człowiekiem:

- pomiarów nie powinno się wykonywać nad źródłem emisji CO₂, z obszaru pomiarów należy wyłączyć całą objętość nad łóżkiem ze śpiącym człowiekiem,
- miejsce pomiarów powinno znajdować się z dala od powierzchni grzejnych i otworów nawiewnych w tym okien,
- czujniki pomiarowe powinny być umieszczone w pewnej odległości od ścian,
- obszarem rekomendowanym dla pomiarów stężenia ditlenku węgla jest środek pokoju.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pokazały, że modelowanie CFD jest bardzo dobrym narzędziem do modelowania przestrzennego rozkładu stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu. Może ono być z powodzeniem wykorzystywane do wyznaczania reprezentatywnych obszarów pomiaru stężenia ditlenku węgla na potrzeby określania międzystrefowych przepływów powietrza.

Wnioski wynikające z realizacji niniejszej pracy pozwalają na sformułowanie zadań odnośnie dalszych badań. W ramach dalszych prac doskonalących metodę określania międzystrefowych przepływów powietrza w oparciu o pomiar stężenia ditlenku węgla należy rozważyć zastosowanie algorytmu do przeszukiwania przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań dla strumieni powietrza w celu określenia właściwego punktu startowego do obliczeń. Powinny zostać przeprowadzone również obliczenia mające na celu określenie ograniczeń dla stosowanej metody odnośnie maksymalnej liczby stref i strumieni powietrza możliwych do wyznaczenia w opracowanym programie komputerowym. Zbadania wymagają również przebiegi czasowe krzywych stężenia ditlenku węgla w strefach pomiarowych dla najbardziej niekorzystnych warunków tj. krzywe prawie do siebie równoległe o płaskim przebiegu. Dla takich układów krzywych stężenia CO₂ może istnieć nieskończenie wiele rozwiązań lub ich brak ze względu na złe uwarunkowanie zadania odwrotnego. Dalsze badania dotyczące numerycznego modelowania rozprzestrzeniania się wydychanego przez człowieka ditlenku węgla powinny obejmować pomieszczenia z innym przestrzennym rozkładem stężenia ditlenku węgla. Obliczeniami powinny zostać objęte pomieszczenia z różnym usytuowaniem źródła CO₂ w stosunku do otworów nawiewnego i wywiewnego, o innej kubaturze z dodatkowymi elementami wyposażenia. Zbadania wymaga również wpływ liczby wymian powietrza na przestrzenny rozkład stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu.

Bibliografia

- [1] Nantka M.B. *Instalacje grzewcze i wentylacyjne w budownictwie. Część I. Budynki i ich potrzeby cieplne i wentylacyjne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
- [2] Allard F. *Natural ventilation in buildings*. James & James Science Publishers, London, United Kingdom, 1998.
- [3] Sowa J. *Wpływ badań nad jakością powietrza w pomieszczeniach na ewolucję poglądów dotyczących wymaganej intensywności wentylacji*. Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce 2001. Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002. 303-312.
- [4] Nantka M.B. Airtightness and natural ventilation: A case study for dwellings in Poland. *Journal of Ventilation*, 4(1):79–91, 2005.
- [5] Fanger P.O., Popiołek Z., Wargocki P. *Środowisko wewnętrzne. Wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy*. Politechnika Śląska, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, Gliwice, 2003.
- [6] Recknagel H., Schramek E. R. *Poradnik. Ogrzewanie i klimatyzacja*. EWFE, Gdańsk, 1994.
- [7] Nantka M.B. Indoor climate and energy consumption in buildings with natural ventilation. *ACEE - Architecture, Civil Engineering, Environment*, 1(3):107–118, 2008.
- [8] Jędrzejewska-Ścibak T. Rola wymiany powietrza w kreowaniu jakości powietrza wewnętrznego budynków. strony 31–38. Jakość powietrza w pomieszczeniach. Polskie problemy na przełomie 1995/96, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, 1996.
- [9] ASTM Standard D 6245-98. Standard guide for using indoor carbon dioxide concentration to evaluate indoor air quality and ventilation.
- [10] ASHRAE 62-1989. Ventilation for acceptable indoor air quality, 1989. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [11] Etheridge D., Sandberg M. *Building ventilation: Theory and measurement*. John Wiley & Sons. Chichester, England, 1996.

- [12] Persily A.K. Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. *ASHRAE Transaction*, 103(2):193–204, 1993.
- [13] Sowa J., Bartkiewicz P. Stężenie dwutlenku węgla jako źródło informacji o jakości powietrza w pomieszczeniach. strony 336–345. 6 Konferencja Naukowo-Techniczna. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź, 1997.
- [14] Rusinowska A., Głąb A. Indoor environment of the prototype house Naturalny Dom in Gdynia equipped with ERS - energy recycling system. Energy efficient technologies in indoor environment. International conference, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2005.
- [15] Liddament M. Why CO₂? *Air Infiltration Review*, 18(1):1–7, 1996.
- [16] Penman J.M., Rashid A.A.M. Experimental determination of air-flow in a naturally ventilated room using metabolic carbon dioxide. *Building and Environment*, 17(4):253–256, 1982.
- [17] Penman J.M. An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide. *Building and Environment*, 15:45–47, 1980.
- [18] Smith P.N. Determination of ventilation in occupied buildings from metabolic carbon dioxide concentration and production rates. *Building and Environment*, 23(2):253–256, 1988.
- [19] Awbi H.B. *Ventilation of buildings*. Taylor and Francis Group, London, 2003.
- [20] Mierzwiński S. *Aerodynamika wentylacji ogólnej*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
- [21] Awbi H.B. *Ventilation systems. Design and performance*. Taylor and Francis, 2008.
- [22] Goodfellow H., Tähti E. *Industrial ventilation. Design guidebook*. Academic Press, 2001.
- [23] *ASHRAE Fundamentals Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2001.
- [24] Yoguo L., Shuangping D., Guoqiang Z. Multiple solution in a building with four openings ventilated by combined forces. *Indoor and Built Environment*, 14(5):347–358, 2005.
- [25] Shuangping D., Yugu L. An example of solution multiplicity in a building with bi-directional flow openings. *Indoor and Built Environment*, 14(5):359–369, 2005.
- [26] Dols W.S., Walton G.N. *CONTAMW 2.0 User Manual*. National Institute of Standards and Technology, 2002.

- [27] Smith B.V. Feustel H.E. *COMIS 3.0 - User's Guide*. Berkeley, California, <http://epb.lbl.gov/comis/users.html>, 1993.
- [28] Feustel H.E. Comis - an international multizone air-flow and contaminant transport model. *Energy and Buildings*, 30:3–18, 1999.
- [29] Plathner P., Woloszyn M. Interzonal air and moisture transport in a test house: experiment and modelling. *Building and Environment*, 37:189–199, 2002.
- [30] Nantka M.B. *Problemy identyfikacji przepływów powietrza i wymiany powietrza w budynkach wielostrefowych z wentylacją naturalną*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.
- [31] Baranowski A. *Modelowanie wentylacji naturalnej budynków wielorodzinnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
- [32] Megri A.C., Haghghat F. Zonal modelling for simulating indoor environment of buildings: Review, recent developments and applications. *HVAC&R Research*, 13(6):887–905, 2007.
- [33] Axley J. Multizone airflows modelling in buildings: History and theory. *HVAC&R Research*, 13(6):907–928, 2007.
- [34] Versteeg H. K., W. Malalasekera. *Computational Fluid Dynamics. The finite volume method*. Longman Scientific and Technical, Loughborough, 1995.
- [35] Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, 1980.
- [36] Ferziger J.H., Perić M. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 2002.
- [37] Nielsen P. V., Allard F., Awbi H. B., Davidson L., Schälin A. *Computational fluids dynamics in ventilation design*. Rehva, 2007.
- [38] Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation. *Fluid Mechanics*, 31:201–238, 1999.
- [39] Lipska B. *Kontrola jakości numerycznego modelowania przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
- [40] McWilliams J. *Review of air flow measurement Techniques*. Paper posted at the eScholarship Repository, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-49747>, 2002.
- [41] Perera M., Walker R., Heathway M., P. Warner. *Natural ventilation in large and multi-cell buildings: Theory, measurement and prediction (Final Report)*. Building Research Establishment, Garston, United Kingdom, 1894.

- [42] PN-EN ISO 12569: 2004. Izolacja cieplna w budynkach. Określanie wymiany powietrza w budynkach. Metoda gazu znacznikowego, 2004. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [43] ASTM E 741 00. Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution, 2000. American Society for Testing and Materials.
- [44] Sherman M.H. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4):365–374, 1990.
- [45] Gierczycka E., Baranowski A., Błaszczok M., Popiołek Z. Badania wymiany powietrza w mieszkaniu metodą zaniku stężenia gazu znacznikowego. strony 65–72. *Mechanika Płynów w Inżynierii Środowiska*, Wiśła, 2001.
- [46] Barankowa P., Naydenov K., Melikov A., Sundell J. Distribution of carbon dioxide produced by people in a room: Part 1 - laboratory study. Proceedings of Roomvent, University of Coimbra, Portugal, 2004.
- [47] Popiołek Z. Methods for air-change measurements in ventilated rooms. First International Seminar Healthy Buildings, Sofia, Bulgaria, 2003.
- [48] Dickerhoff D., Sherman M., Ameral I., Feustel H. Description of the LBL multitracer measurement system. Report LBL-26538, 1989. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley.
- [49] Sherman M.H. On estimation of multizone ventilation rate from tracer-gas measurements. *Building and Environment*, 24(4):355–362, 1989.
- [50] Sherman M.H. Uncertainty in air flow calculations using tracer gas measurements. *Building and Environment*, 24(4):347–354, 1989.
- [51] Sieber R.P., Besant R.W., Schoenau G.J. Variations in interzonal airflow rates in a detached house using tracer gas techniques. *ASHRAE Transaction*, 99(9):699–708, 1993.
- [52] Ohira N., Yagawa N., Gotoh N. Development of a measurement system for multizone infiltration. *ASHRAE Transaction*, 100(2):692–698, 1994.
- [53] Sohn M. D., Small M. J. Parameter estimation of unknown air exchange rates and effective mixing volumes from tracer gas measurements for complex multi-zone indoor air models. *Building and Environment*, 34:293–303, 1999.
- [54] Brohus H., Frier C. Tracer gas measurement of air flow in multizone building. 8th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [55] Miller S.L., Leisersona K., Nazaroff W.W. Nonlinear least-squares minimization applied to tracer gas decay for determining airflow rates in a two-zone building. *Indoor Air*, 7:64–75, 1997.

- [56] CEN CR 1752. Ventilation for buildings - design criteria for the indoor environment, 1998. European Committee for Standardization.
- [57] Gierczycka E., Ferdyn-Grygierek J. Wykorzystanie wytwarzanego metabolicznie dwutlenku węgla do określania wymiany powietrza w pomieszczeniu. strony 245–254. VIII Ogólnopolskie Sympozjum „Zastosowanie mechaniki płynów w inżynierii i ochronie środowiska”, Gliwice - Wisła, 2003.
- [58] Sowa J. Ocena intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach na podstawie interpretacji zmian stężenia ditlenku węgla. *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska*, 31:23–46, 1999.
- [59] Rusinowska A. (Bulińska A.). Pomiar wymiany powietrza w oparciu o rejestrację zmian stężenia wytwarzanego metabolicznie dwutlenku węgla. Praca magisterska, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2004.
- [60] Afonso C.F.A., Maldonado E.A.B. A single tracer-gas method to characterize multi-room air exchanges. *Energy and Buildings*, 9:273–280, 1986.
- [61] O'Neill P.J., Crawford R.R. Identification of flow and volume parameters in multizone systems using a single-gas tracer technique. *ASHRAE Transaction*, 71(1):49–53, 1991.
- [62] Ozisik M.N., Orlande H.R.B. *Invers heat transfer. Fundamentals and applications*. Tylor and Francis, 2000.
- [63] Borchiellini R. Function estimation of ventilation rates from tracer gas measurement. *Building and Environment*, 32(2):167–185, 1997.
- [64] Press W. H. et al. *Numerical Recipes. The art of scientific computing*. Cambridge University Press, 2007.
- [65] Sundell J., Melikov A., Naydenov K., Barankowa P. Distribution of carbon dioxide produced by people in a room: Part 2- field study. Proceedings of Roomvent University of Coimbra, Portugal, 2004.
- [66] Buggenhouta S.V. nad Brecht A.V., Özcan S.E., Vranken E., Malcot W.V., Berckmans D. Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. *Biosystems engineering*, 104:216–223, 2009.
- [67] Mui K.W., Wong L.T., Ho W.L. Evaluation on sampling point densities for assessing indoor air quality. *Building and Environment*, 41:1515–1521, 2006.
- [68] Mahyuddin N., Awbi H. The spatial distribution of carbon dioxide in an environmental test chamber. *Building and Environment*, 45:1993–2001, 2010.

- [69] Ivings M.J., Gant S.E., Kensley A., Gobeau N. *Factors influencing the indoor transport of contaminants and modelling implications*. HSL/2006/29. Health and Safety Laboratory, Buxton, UK, 2006.
- [70] Ivings M., Garrard A., Gobeau N., D. Mark. *Feasibility study of modelling particle deposition onto a person using computational fluid dynamics*. HSL/2006/82. Health and Safety Laboratory, Buxton, UK, 2006.
- [71] Huang J. M., Chen Q., Ribot B., Rivoalen H. Modelling contaminant exposure in a single-family house. *Indoor and Built Environment*, 13:5–19, 2004.
- [72] Son C.H. Computational fluid dynamics simulation helps protect astronauts in space station from CO₂. *Journal Articles by F L U E N T Software Users*. www.fluent.com.
- [73] Ghiaus C., Allard F. *Natural ventilation in the urban environment. Assessment and design*. Earthscan, United Kingdom, 2005.
- [74] PN-83/B-03430. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania, 1983. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [75] PN-83/B-03430/Az3. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania. Zmiana Az3, 2000. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [76] PN-EN 15251:2007. Kryteria Środowiska wewnętrznego obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas, 2007. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [77] PN-EN 13779. Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji, 2008. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [78] Malicki M. *Wentylacja i Klimatyzacja*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1980.
- [79] Lipska B., Nawrocki W. *Podstawy projektowania wentylacji - Przykłady*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
- [80] O'Neill P.J. A survey of tracer gas techniques for estimation airflow and effective volumes in single and multizone buildings. 71(1):49–53, 1990.
- [81] Górka P., Kowalski S., Kozielska B., Melaniuk-Wolny E., Oparczyk G., Zajusz-Zubek E., Żak M. *Badanie zanieczyszczeń powietrza. Cz.I. Gazowe substancje zanieczyszczające*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [82] Seńczuk W. i in. *Toksykologia. Podręcznik dla lekarzy i farmaceutów*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2005.

- [83] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, 2002.
- [84] Sowiński P. Metodyka oceny jakości powietrza w pomieszczeniach wewnętrznych w oparciu o poziom stężenia dwutlenku węgla. strony 137–144. Jakość powietrza w pomieszczeniach. Polskie problemy na przełomie 1995/96, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, 1996.
- [85] Bulińska A., Buliński Z. Estimation of the airflow pattern within the occupied flat based on the measurements of the carbon dioxide concentration. *Proceedings of the XIIIth International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy. HTRSE-2010*, strony 495–502. Wydaw. Uczelnianie Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin, 2010.
- [86] Bulińska A. Determination of airflow pattern in a residential building using metabolic carbon dioxide concentration measurements. strona 188. 10th International Conference on Air Distribution in Rooms. SCANVAC Conference, Roomvent 2007, Helsinki, Finland, 2007.
- [87] Bulińska A. Analiza międzystrefowych przepływów powietrza na podstawie stężenia dwutlenku węgla. strony 29–38. Zastosowanie mechaniki płynów w inżynierii i ochronie środowiska. Dziewiąte ogólnopolskie sympozjum, Gliwice - Wisła, 20-23 czerwca, Politechnika Śląska. Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, 2007.
- [88] Gao N., Niu J. Cfd study on micro-environment around human body and personalized ventilation. *Building and Environment*, 39:795–805, 2004.
- [89] Gao N., Niu J. Cfd study of thermal environment around a human body: A review. *Indoor and Build Environment*, 14(1):5–16, 2005.
- [90] Murakami S. Analyses and design of micro-climate around the human body with respiration by CFD. *Indoor Air*, 14(7):114–156, 2004.
- [91] Kostowski E. *Przepływ ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1995.
- [92] M. Deevy, Gobeau N. *CFD modelling of benchmark test cases for a flow around a computer simulated person. HSL/2006/51*. Health and Safety Laboratory, Buxton, UK, 2006.
- [93] White F.M. *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, 2008.
- [94] *Fluent Product Documentation*. www.fluent.com.

- [95] Davidson L. *An introduction to turbulence models. Report 97/2.* Department of Thermo and Fluid Dynamic, CHALMERS University of Technology, Göteborg, Sweden, <http://www.tfd.chalmers.se/lada/allpaper.html>, 2003.
- [96] Pope S.B. *Turbulent Flows.* Cambridge University Press, 2009.
- [97] Zhang Z., Zhang W. Evaluation of various turbulence models in predicting airflows and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2 - comparison with experimental data from literature. *HVACR Research*, 13(6):871–886, 2007.
- [98] Amezzane I., Awada A., Sawan M. Modelling and simulation of an infant's whole body plethysmograph. *Building and Environment*, 39:795–805, 2004.
- [99] Hayashi T., Ishizu Y., Kato S., S. Murakami. Cfd analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant. *Building and Environment*, 37:219–230, 2002.
- [100] Hyldgaard E.C. Humans as a source of heat and air pollution. Forth International Conference on Air Distribution in Rooms Roomvent, Cracow, Poland, 1994.
- [101] Gao N., Niu J. Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment. *Building and Environment*, 41:1214–1222, 2006.
- [102] Murakami S., Kato S., Zeng J. Combined simulation of airflow, radiation and moisture transport for heat release from human body. *Building and Environment*, 35:489–500, 2000.
- [103] Sparrow E.M., Husar R. B., Goldstein R. J. Observations and other characteristics of thermals. *Journal of Fluid Mechanics*, 41(4):793–800, 1970.
- [104] Bejan A. *Convection heat transfer.* John Wiley & Sons, 1995.
- [105] *Gambit manual.* www.fluent.com.
- [106] Brohus H. *Personal exposure to contaminant sources in ventilated rooms.* Praca doktorska, Aalborg University, Denmark, 1997.
- [107] Höppe P. Temperatures of exhaled air under varying climatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, 25(2):127–132, 1981.
- [108] Bulińska A. Computational and experimental investigation of the metabolic carbon dioxide propagation within a room. strona 241. 10th Rehva World Congress. Clima 2010, Antalya, Turkey, 2010.