



*POLITECHNIKA WROCLAWSKA
Instytut Inżynierii Środowiska
Katedra Klimatyzacji i Ciepłownictwa*

PRACA DOKTORSKA

„KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU W OBIEKTACH HANDLOWYCH I USŁUGOWYCH”



Autor:

mgr inż. Sylwia Szczęśniak

Promotor:

Prof. dr inż. Gerard Jan Besler

**Wrocław
Kwiecień 2004 r.**

Panu Profesorowi **Gerardowi Janowi Beslerowi**
promotorowi pracy
składam serdeczne podziękowanie
za życzliwą pomoc przy jej tworzeniu.

Prezesom i Pracownikom firmy PWPO-T PROMONT Świebodzice
dziękuję za wykonanie i wyposażenie stanowiska badawczego,
bez którego wykonanie niniejszej pracy byłoby niemożliwe.

Kolegom z Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa
Panu dr inż. Aleksandrowi Pelechowi
Panu dr inż. Edwardowi P. Zydrożnemu
dziękuję za dobre rady
Panu mgr inż. Marcinowi Sompolińskiemu
dziękuję za pomoc przy pomiarach.

Autorka

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
CEL I TEZA PRACY	6
1. WSTĘP	7
1.1. <i>Krótką historia rozwoju handlu</i>	<i>7</i>
1.2. <i>Charakterystyka obiektów handlowych</i>	<i>9</i>
1.3. <i>Obiekty handlowe w Polsce</i>	<i>11</i>
1.4. <i>Funkcje i zadania obiektów handlowych i usługowych</i>	<i>13</i>
2. MIKROKLIMAT SAL SPRZEDAŻY POMIESZCZEŃ HANDLOWYCH I USŁUGOWYCH	15
2.1 <i>Komfort cieplny – wiadomości ogólne</i>	<i>15</i>
2.2 <i>Komfort cieplny w obiektach handlowych i usługowych</i>	<i>19</i>
3. ROZDZIAŁ POWIETRZA W POMIESZCZENIACH	32
3.1 <i>Ogólne zasady organizowania wymiany powietrza</i>	<i>32</i>
3.2 <i>Strumienie powietrza</i>	<i>32</i>
3.3 <i>Wypływ powietrza z niezasłoniętych otworów kołowych, kwadratowych i prostokątnych</i>	<i>33</i>
3.4 <i>Wypływ powietrza ze szczelin o długości nieskończonej</i>	<i>37</i>
3.5 <i>Promieniowy wypływ powietrza</i>	<i>38</i>
3.7 <i>Indukcja powietrza z pomieszczenia przez strugi nawiewne</i>	<i>41</i>
3.8 <i>Strugi nieizotermiczne</i>	<i>42</i>
3.10 <i>Organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniach handlowych</i>	<i>44</i>
4. URZĄDZENIA KLIMATYZACYJNE I WENTYLACYJNE	49
4.1 <i>Indywidualne urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne</i>	<i>49</i>
4.2 <i>Centralne urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne</i>	<i>54</i>

4.3. Urządzenia z dwustopniowym uzdatnianiem powietrza	59
5. STANOWISKO POMIAROWE	65
5.2. Opis stanowiska	65
5.2. Opis wielkości mierzonych	69
6. ANALIZA WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW	73
6.1. Uwagi ogólne	73
6.2. Rozkład prędkości względnych	73
6.3. Widmo prędkości w odległości od nawiewnika	75
6.4. Maksymalne prędkości względne	77
6.5. Stopnie mieszania	82
7. STATYSTYCZNE ORACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW	85
7.1. Prędkości maksymalne w strugach nawiewnych	85
7.2. Stopnie mieszania	96
8. ANALIZA DOKŁADNOŚCI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I OBLICZEŃ	105
8.1. Metoda wyznaczania błędów	105
8.2. Błędy przypadkowe	105
8.3. Błędy wielkości mierzonych	107
9. PODSUMOWANIE	110
10. PIŚMIENNICTWO	113

STRESZCZENIE

W pracy omówiono zasady kształtowania mikroklimatu w obiektach handlowych i usługowych. Z uwagi na nieliczne w kraju opracowania dotyczące wymaganych parametrów mikroklimatu w obiektach handlowych i usługowych w pracy przedstawiono zakresy dopuszczalnych temperatur oraz wilgotności względnych dla pomieszczeń w tych obiektach, w zależności od ich funkcji, przeznaczenia oraz standardu.

Ponadto w pracy usystematyzowano i omówiono rozwiązania systemów wentylacji/klimatyzacji, które mogą być wykorzystane do kształtowania mikroklimatu w omawianych obiektach. Przedstawione i omówione w pracy przykłady rozwiązań są aktualnie szeroko stosowanymi.

Szczegółowej analizie poddano zintegrowane elementy nawiewno-wywiewne, zalecane do kształtowania przepływu powietrza wentylującego/klimatyzującego zwłaszcza w niskich pomieszczeniach handlowych o dużych zyskach ciepła. Dokładnej analizie poddano promieniowy wpływ powietrza. Przebadano strugi nawiewne wachlarzowe wypływające z elementów nawiewnych o otworach różnie przesłoniętych. Celem przebadania zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych zbudowano stanowisko pomiarowe, na którym przeprowadzono ok. 42 cykle pomiarowe (~ 6700 punktów pomiarowych).

Po przeprowadzeniu analizy statystycznej (regresja liniowa wielokrotna) otrzymano kilkanaście formuł matematycznych opisujących zależności prędkości maksymalnych w strefie przejściowej i strefie głównej oraz stopni mieszania od zmiennych niezależnych.

Otrzymane formuły matematyczne, dotyczące zarówno prędkości maksymalnych jak i stopni mieszania pozwalają na właściwy dobór elementów nawiewno-wywiewnych dla kształtowania przepływu powietrza, szczególnie w pomieszczeniach o często zmieniającej się funkcji i wystroju.

Cel pracy:

Celem pracy jest zaprojektowanie, oraz przebadanie zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych oraz ocena ich przydatności do skutecznego kształtowania mikroklimatu szeregu zróżnicowanych pomieszczeń handlowych i usługowych.

Dla badanych zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych zasadniczym celem był opis zjawiska rozplywu strug pierścieniowych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz określenie warunków mikroklimatu dla różnego rodzaju obiektów handlowych i usługowych oraz wytypowanie i usystematyzowanie systemów wentylacji/klimatyzacji dla jego kształtowania.

Teza pracy:

Do kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach handlowych i usługowych mogą być stosowane zintegrowane elementy nawiewno-wywiewne. Pierścieniowy nawiew powietrza może dawać lepsze rezultaty w przypadku wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń o zdecydowanie dodatnich bilansach ciepła, w porównaniu z nawiewnikami o stosowanej dotychczas konstrukcji (anemostaty, kratki, dysze nawiewne).

1.WSTĘP

1.1. Krótka historia rozwoju handlu

Relacje między produkcją a sprzedażą towaru na przestrzeni dziejów były różne. U zarania dziejów produkty wytwarzane oraz użytkowane były w jednym miejscu. Wraz ze wzrostem liczby ludności, rozwojem cywilizacji, rozwinął się handel i specjalizacja produkcji. Miejsce wytwarzania oraz miejsce zbytu zmieniły się. Pojawiły się grupy osób pośredniczące pomiędzy wytwórcą o odbiorcą towaru, a więc powstało zjawisko zwane handlem.

Już najstarsze cywilizacje wykazywały potrzebę poznawania, wymiany towarów oraz doświadczeń. Badania archeologiczne potwierdziły, że już w III w p.n.e. we wszystkich niemal regionach Bliskiego Wschodu rozwijał się handel. Na początku stanowił on jedną z najprostszych form wymiany towarów i usług. Nie było mowy o czynniku czy człowieku pośredniczącym w wymianie towarów. Towary i usługi wymieniane były jedne na drugie. Z upływem czasu, wraz ze zwiększeniem zapotrzebowania na towary i usługi w celu ułatwienia rozliczeń wprowadzono środki płatnicze.

Początkowo handel odbywał się poza bramami miast lub osad i miał charakter tymczasowy. Towary kupowane i sprzedawane były po żniwach, po polowaniach oraz w związku ze świętami bądź odbywającymi się uroczystościami.

Ze zwiększonym zapotrzebowaniem ludzi na nowe miejsca zamieszkania oraz wraz ze wzrostem chęci poznawania coraz to nowych miejsc na kuli ziemskiej, wyprawy handlowe stały się zasadniczym czynnikiem państwo- i miastotwórczych. Wyprawy handlowe miały znaczenie ekonomiczne i polityczne. Przy głównych szlakach handlowych, przy ich skrzyżowaniach zaczęły powstawać tzw. osady targowe. Na początku były to wydzielone miejsca tzw. targi, składające się z drewnianych ław i straganów. Potem targi te zastąpiono jedno- lub dwuizbowymi domami ustawianymi wzdłuż wyłożonych drewnem uliczek. Domy takie stanowiły miejsce pracy, odpoczynku i zamieszkania [28].

Burzliwy rozwój miast związany był z handlem i przemianami gospodarczymi powodowanymi rewolucją przestrzenną miast oraz nadawaniem nowych aktów prawnych (nadania targowe, uprawnienia handlowe, obowiązki fiskalne lub zwolnienia od opłat

celnych, targowych i dzierżawnych). Wynikiem tego było wznoszenie, w większych ośrodkach handlowych (Kraków, Wrocław, Toruń) coraz większej liczby kamiennych obiektów. Budowle te zachwycały architekturą oraz świadczyły o opanowaniu nowych technik budowania. Powstawały charakterystyczne dla tego okresu (ok. XII wiek n.e.) murowane hale kupieckie i sukiennice. Nieco później zaczęły pojawiać się budynki o charakterze miejskim. Obiekty handlowe lokalizowane były w centrum, na placu rynkowym. Komunikacja odbywała się na tzw.: ringu, który stanowiła ulica wokół obiektu handlowego. Pomieszczenia sklepowe pojawiły się pod koniec średniowiecza, wymuszone to było stałym wzrostem podaży. Zarysowała się potrzeba ekspozycji towarów oraz reklamy usług. Konieczne stało się zapewnienie klientom wygody. Pomieszczenia sklepowe i usługowe chroniły od zmiennych warunków atmosferycznych. Handel nie był już zjawiskiem sezonowym, ale wtopił się w codzienne życie człowieka [68].

Od czasów średniowiecza aż do XIX wieku rozwój handlu postępował dość powoli. Dopiero rewolucja przemysłowa oraz rozkwit komunikacji spowodowały szybki rozwój struktury handlu oraz znaczny wzrost liczby obiektów handlowych.

Ciasna zabudowa placów rynkowych zaczęła ulegać zmianie. Wznoszono nowe ratusze oraz inne budynki administracyjne i usługowe. Miasta przeżywały „drugą rewolucję przestrzenną” polegającą na rozdzieleniu miejsca pracy od miejsca zamieszkania. Spowodowało to powstanie w organizmie miejskim elementów spełniających określoną, przyporządkowaną im funkcję, tj.: centra administracyjne i handlowo-usługowe, przemysłowe, tereny mieszkaniowe – osiedla, tereny rekreacyjne [69].

Wraz z rewolucją przemysłową nastąpił gwałtowny wzrost rozmiarów produkcji, za którym podążał wzrost poziomu konsumpcji. Pojawiła się konieczność zapewnienia klientowi możliwości dokonywania wielobranżowych zakupów pod jednym dachem. Tak rozpoczęła się era domów towarowych i pasażów handlowych.

Pierwszym domem towarowym, który powstał w Europie był Magasin au Bon Marche zaprojektowany przez G.Eiffela i L.A. Boileau’a. Pierwszym samoobsługowym domem handlowym (wybudowanym w 1912) mogły poszczycić się Stany Zjednoczone.

Pierwsze supermarkety, których powierzchnia sprzedaży wynosiła ok. 400 ÷ 2 500 m² oraz hipermarkety o powierzchni powyżej 2 500 m² powstały w latach trzydziestych XX wieku. W latach 80 XX wieku w obiektach handlowych tego typu sprzedawane było już

70% artykułów użytku codziennego. Jednak w Europie pierwszy supermarket powstał dopiero w 1949 r. we Francji. Wybudował go E.Leclerc. Sieć tych sklepów prosperuje w Europie do dziś.

Z uwagi na ograniczenie kosztów budowy i eksploatacji supermarket E.Leclerc mógł obniżyć koszty sprzedawanych towarów aż o 13%.

Współczesne supermarkety i hipermarkety charakteryzują się dużymi powierzchniami sprzedaży detalicznej, przystosowanymi do obsługi ogromnej liczby klientów, lecz adekwatnie do tego niską jakością oferowanych towarów. W Stanach Zjednoczonych spotyka się współcześnie dwa rodzaje obiektów:

- „conglomerand” - sklepy o rozbudowanej powierzchni sprzedaży przedstawiające w swojej ofercie produkty niskiej jakości, kierowane dla mało wymagającego odbiorcy,
- „shopping malls” – obiekty w których asortyment oferowanych towarów i usług jest wysoki.

W ten sposób zarówno biedna jak i zamożna część społeczeństwa znajdują sieci sklepów odpowiednie dla siebie. W Polsce brak jeszcze takiego podziału. Związane jest to z dość późnym okresem boomu handlowego, który rozpoczął się w naszym kraju praktycznie w drugiej połowie lat 90 XX wieku.

Odmiennymi obiektami handlowymi są domy towarowe oraz sklepy firmowe, które cechuje bardzo wysoki standard oferowanych towarów i usług. Obiekty tego typu muszą walczyć o swój byt z silną konkurencją, jaką stanowi dla nich rozwój super- i hipermarketów, w które są hamulcem ekspansywnego rozwoju handlu komercyjnego.

Warto także wspomnieć o nowej metodzie kupna i sprzedaży, której rozwój następuje w dość szybkim tempie. Jest to forma sprzedaży internetowej. Obniża to koszty oferowanych usług. Zdarza się, że towary oferowane w sieci sprzedaży internetowej nie są opodatkowane, przez co są atrakcyjniejsze cenowo. Niewątpliwie ten typ oferowanych usług i w Polsce znajdzie swoich zagorzałych zwolenników.

1.2. Charakterystyka obiektów handlowych

[Rozwój gospodarki kształtowany jest przez popyt i podaż. Gdy te istnieją wówczas występuje wzrost zapotrzebowania na nowoczesne obiekty handlowe.] Ze wzrostem liczby nowoczesnych centrów handlowych spada ilość typowych miejskich sklepików oraz tzw. ”domów towarowych”. Znaczny przyrost tych drugich zauważany był w latach 60 i 70, kiedy powstawały duże, wielokondygnacyjne sklepy o specyficznych charakterystykach architektoniczno-budowlanych. Spadek rentowności i oraz coraz częściej zauważane bankructwa tychże obiektów handlowych zdają się być wynikiem nagłego wzrostu liczby wielofunkcyjnych obiektów handlowych (tzw. supermarketów). Dużą jest żywiołowość realizacji obiektów i centrów handlowych. Najważniejszymi są względy ekonomiczne. [Centra handlowe budowane są chaotycznie, w miejscach, w których inwestorzy spodziewają się szybkiego zwrotu poniesionych kosztów oraz dużych zysków ze sprzedaży oferowanych, często niskiej jakości produktów.] Większość nowych obiektów handlowych powstających w naszym kraju to budynki o charakterze „supermarketów”. Przytłaczają nieciekawą, prawie przemysłową formą. [W pogoni za szybkim i jak największym zyskiem często zapomina się o efekcie architektonicznym [28]. Są to, więc obiekty tanie z nieciekawą architekturą. Do rzadkości należą centra handlowe, w których poza zakupami można spędzić czas na odpoczynku, przyjemnych rozrywkach oraz rekreacji z rodziną i znajomymi.]

[Obiekty handlowe, choć proste zewnętrznie, są budynkami o bardzo złożonej strukturze wewnętrznej. Jest to związane z różnorodnością występujących w nich funkcji, sposobu użytkowania, rozwiązań technicznych i technologicznych.]

[Aktualnie istnieje ogromne zapotrzebowanie na budowę i rozwój infrastruktury handlowo-usługowej.] Mamy do czynienia z ogromnym zapotrzebowaniem, zainteresowaniem oraz co za tym idzie realizacją dużych, wielofunkcyjnych centrów handlowo-usługowych. W naszym kraju oraz w innych krajach europejskich, szczególnie w krajach Europy Wschodniej i Środkowej rocznie budowanych jest ogromna liczba tego typu obiektów. Wydaje się, że potężne hale sprzedaży wyrastają jak ”grzyby po deszczu”. W samym Wrocławiu w ciągu kilku lat powstało ok. 20 wielkich obiektów. W dalszym ciągu, buduje się nowe, które mają zapewnić klientowi komfort zarówno cieplny jak i „cenowy”.

Szczególną uwagę w takich obiektach zwraca się na stan powietrza, wystrój wnętrza oraz otoczenie, w którym przebywa zarówno sprzedający jak i kupujący. Budownictwo handlowe i usługowe należy do najbardziej energochłonnych w aglomeracjach miejskich.

W Polsce na cele kształtowania mikroklimatu i ciepłą wodę użytkową zużywa się ponad 40% produkowanej energii. Na samą budowę zużywane jest ok. 8%. Pozostałą część energii pochłaniają koszty eksploatacyjne [28]. W tej sytuacji najważniejszym staje się problem ograniczenia energii potrzebnej do eksploatacji obiektów handlowych i usługowych do niezbędnego minimum. Jest to możliwe jedynie przez ścisłą współpracę zarówno projektantów różnych branż już na etapie założeń. Wzajemne zrozumienie potrzeb ograniczania kosztów eksploatacji (nawet kosztem wyższych nakładów inwestycyjnych) pozwoli ograniczyć zużycie energii. Instytut Słonecznych Systemów Energetycznych (Fraunhofer Institut für Solar Energiesysteme [28]) we Freiburgu przedstawił wytyczne, które mają wpłynąć na poprawę ekonomiczności w budownictwie. Są to:

- technika podporządkowana względem społecznym,
- technika na skalę ludzką,
- technika podporządkowana środowisku naturalnemu.

Z uwagi na powyższe w budownictwie powinno dążyć się do:

- poprawy zdrowotności budynków,
- zmniejszenia obciążeń środowiska naturalnego,
- minimalizacji zużycia energii podczas wznoszenia i eksploatacji budynków,
- maksymalnego wykorzystania źródeł energii odnawialnej,
- zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do środowiska naturalnego.

Ogrzewanie oraz wentylacja i klimatyzacja spełniają w obiektach handlowych bardzo ważną rolę. Prawidłowo zaprojektowany system klimatyzacji i wentylacji winien zapewnić warunki komfortu cieplnego dla przebywających w pomieszczeniach handlowych klientów i sprzedawców w sposób możliwie tani i energooszczędny.

1.3. Obiekty handlowe w Polsce

Są dwa główne rodzaje handlu - hurtowy i detaliczny. Ten pierwszy zajmuje się obrotem większych partii towaru. Zaopatruje handel detaliczny w towary.

Handel detaliczny jest na rynku handlowym ważniejszy, ponieważ dotyczy bezpośrednio odbiorców-konsumentów.

W Polsce obowiązywały następujące kryteria podziału obiektów handlowych [1]:

- pomieszczenia sklepowe, lokalizowane głównie w centrach miast, w pierzejach ulic miejskich, rynkowych oraz pasażach,
- osiedlowe ośrodki handlu o powierzchni sprzedaży od $120 \div 300 \text{ m}^2$ uważane za sklepy powszechne, zlokalizowane o $\sim 10 \div 15 \text{ min}$ od miejsca zamieszkania,
- ośrodki śródmiejskie i dzielnicowe o powierzchni sali sprzedaży powyżej 400 m^2 , z reguły jako jedno- lub dwupoziomowe pawilony handlowe,
- usługi ponadpodstawowe, domy towarowe i handlowe o powierzchni sprzedaży powyżej $2 \text{ } 500 \text{ m}^2$ i zróżnicowanym asortymencie towarów.

Różnicowano:

- małe sklepy branżowe i wielobranżowe,
- sklepy samoobsługowe,
- domy towarowe.

Zasadniczym celem współczesnego handlu jest dążenie do obniżania cen towarów przez obniżanie m.in. kosztów sprzedaży. Mamy do czynienia z silną konkurencją pomiędzy sieciami handlowymi. Powstają scentralizowane obiekty handlowe (duże, pod jednym dachem, ekonomiczne w eksploatacji, dla zachęcenia klienta uzupełniane o funkcje towarzyszące).

Tak więc buduje się wielofunkcyjne obiekty handlowe, które pełnią funkcje:

- handlowe,
- usługowe,
- rekreacyjne,
- kulturalne,
- administracyjne.

Duże i rozbudowane obiekty handlowo-usługowe oprócz dużych powierzchni sprzedaży posiadają także:

- ekskluzywne butik,
- wszelkie usługi (fryzjer, kosmetyczka, siłownia, salony odnowy biologicznej, dorabianie kluczy, itd.),
- kina, teatry
- restauracje, kawiarnie, drink bary, puby,
- biura turystyczne,
- filie banków,
- miejsca zabaw dla dzieci,
- itd.

Obiekty tego typu zlokalizowane są w centrach miast, w miejscach o dużym natężeniu ruchu, w pobliżu skrzyżowań głównych ciągów komunikacyjnych lub na obrzeżach miast. Lokalizacja tego typu centrów handlowych zawsze powiązana jest z możliwością zapewnienia miejsc parkingowych jak największej liczbie samochodów tak, aby klient nie miał problemów z możliwością postawienia samochodu w pobliżu miejsca dokonywania zakupów.

Inną tendencją, pojawiającą się w Polsce, jest adaptacja istniejących już obiektów handlowych, pasaży oraz rynków handlowych na eleganckie i wytworne obiekty zachęcających klientów wysoką jakością prezentowanych towarów i usług. Sklepy te nie są przeznaczone dla masowego klienta i wymagają szczególnej troski i uwagi przy ich modernizacji. Bardzo ważny jest wówczas prawidłowo działający system klimatyzacji lub wentylacji pomieszczeń tak, aby klient, właściciel i sprzedawcy byli w pełni zadowoleni.

1.4. Funkcje i zadania obiektów handlowych i usługowych

Zasadniczymi zadaniami obiektów handlowych są [28]:

- zapewnienie odpowiedniego i prawidłowego procesu kupno-sprzedaż tj.: sprawności obsługi, przepustowości klientów i towaru, zabezpieczenie towaru, kontrola,
- zapewnienie dogodnych warunków zakupu towarów i usług,

- stworzenie dogodnych warunków pracy,
- stworzenie warunków ochraniających klienta przed warunkami atmosferycznymi i zagrożeniami współczesnej cywilizacji,
- zabezpieczenie przepływu informacji pomiędzy uczestnikami procesu wymiany handlowej poprzez zapewnienie optymalnej możliwości śledzenia popytu, aktywizacji sprzedaży, itp.,
- kształtowanie pola potrzeb klienta, kształtowanie wzorca konsumpcji.

2. MIKROKLIMAT SAL SPRZEDAŻY POMIESZCZEŃ HANDLOWYCH I USŁUGOWYCH

2.1 Komfort cieplny – wiadomości ogólne

Komfortem cieplnym nazywa się takie warunki otoczenia, z których odczuwa się stan zadowolenia z warunków cieplnych [12]. Z uwagi na różnice biologiczne występujące pomiędzy ludźmi niezwykle trudno jest zapewnić stan zadowolenia z warunków cieplnych wszystkim osobom przebywającym w pomieszczeniu. Należy dążyć, aby jak największa liczba osób przebywająca w pomieszczeniu odczuwała stan komfortu cieplnego.

Dla warunków komfortu cieplnego ważny jest łączny wpływ wielu zmiennych parametrów cieplnych oddziałujących na organizm człowieka.

Najważniejszym jest uzyskanie stanu równowagi cieplnej [12]. Jest to jednak warunek niewystarczający, ponieważ wewnętrzny system termoregulacji organizmu ludzkiego jest na tyle skuteczny, że jest w stanie uzyskać równowagę cieplną nawet przy braku komfortu cieplnego. Dla określenia równania komfortu cieplnego, Fanger w swoim opracowaniu [12] przyjął, że jedyne zmienne parametry fizjologiczne mające wpływ na równowagę cieplną dla danego wydatku energetycznego organizmu to :

- temperatura skóry,
- straty ciepła na odparowanie wydzielonego potu.

Zatem komfort cieplny zależy od wielu czynników mających wpływ na straty ciepła, na odparowanie z powierzchni skóry wydzielonego potu jak i na temperaturę powierzchni skóry człowieka. Głównym czynnikiem, od którego zależy odczuwanie ciepła, zimna oraz zadowolenia lub niezadowolenia z warunków termicznych otoczenia jest bilans cieplny organizmu ludzkiego. Z uwagi na konieczność zachowania prawie stałej temperatury wewnątrzustrojowej organizm ludzki dostarczoną z zewnątrz energię wykorzystuje na procesy życiowe, jakimi są m.in. oddychanie, odżywianie, ruch itp. Jednocześnie w wyniku procesów życiowych ciepło wytworzone w organizmie (zwane ciepłem metabolicznym) oddawane jest na zewnątrz. W warunkach oddziaływania umiarkowanego środowiska cieplnego oraz przy braku zmiany intensywności ruchu ilość wytworzonego ciepła wewnątrz organizmu jest równa stratom ciepła powstałym na skutek jego rozpraszania. W takiej sytuacji organizm ludzki nie będzie akumulował ciepła. Będzie

on znajdował się w stanie równowagi z otoczeniem, a jego bilans cieplny (w takich warunkach) może być wyrażony równaniem [12]:

$$Q - Q_d - Q_w - Q_{ou} - Q_{oj} = Q_p = Q_R + Q_K \quad (2.1)$$

gdzie:

- Q – ciepło wewnętrzne wytworzone w organizmie,
- Q_d – straty ciepła na skutek dyfuzji pary wodnej przez skórę,
- Q_w – straty ciepła na skutek odparowania potu z powierzchni skóry,
- Q_{ou} – straty ciepła utajonego podczas oddychania,
- Q_{oj} – straty ciepła jawnego podczas oddychania,
- Q_p – ciepło przenikającego od skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało,
- Q_R – straty ciepła przez promieniowanie z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało,
- Q_K – straty ciepła przez konwekcję z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało.

Ciepło wytwarza się w organizmie ludzkim głównie podczas procesów utleniania wewnątrzkomórkowego. Niewielka jej część przetwarzana jest na pracę mechaniczną, pozostała na ciepło wewnętrzne. W tabeli 2.1 przedstawiono jednostkowy strumień ciepła wytworzonego w organizmie ludzkim podczas procesów metabolicznych.

Tabela 2.1 Ciepło jednostkowe wytwarzane w organizmie ludzkim podczas procesów metabolicznych.

Rodzaj czynności	Ciepło wytworzone w organizmie ludzkim podczas procesów metabolicznych	Średnio na osobę, przyjmując powierzchnię ciała 1,8 m ²
	W/m ²	W
Spanie	41	74
Leżenie	47	85
Pomoc w sklepie	116	209
Zakupy	93	167

Jednym ze składników bilansu cieplnego, opisanego wzorem 2.1 są straty ciepła związane z dyfuzją pary wodnej przez skórę. Zjawisko to tzw. parowanie utajone nie podlega kontroli przez układ termoregulacji organizmu ludzkiego. Jest ono zależne od różnicy ciśnień cząstkowych pomiędzy ciśnieniem nasyconej pary wodnej w temperaturze skóry człowieka i ciśnieniem cząstkowym pary wodnej w powietrzu otaczającym organizm ludzki.

W warunkach typowych dla komfortu cieplnego można założyć, że z powierzchni ciała ludzkiego odparowuje cała masa wydzielonego potu. W wyniku tego odparowania następuje oddawanie ciepła do otoczenia, a w organizmie ludzkim pojawiają się straty cieplne

Powietrze dopływające do płuc osiąga temperaturę panującą wewnątrz organizmu oraz stan nasycenia parą wodną. Oddychanie zatem, powoduje straty ciepła utajonego (odparowanie wilgoci z warstwy śluzowej dróg oddechowych) i jawnego (konwekcja) z uwagi na to, że powietrze wydychane przez nos ma większą zawartość wilgoci i wyższą temperaturę. Przyjmuje się, że średnia temperatura wydychanego powietrza wynosi $t_{wy} = 34^{\circ}\text{C}$, zatem straty ciepła jawnego podczas oddychania są niewielkie w porównaniu z innymi stratami cieplnymi organizmu.

Bardziej złożonym procesem jest przenikanie ciepła jawnego ze skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej skórę. Zjawisko to składa się zarówno z wymiany ciepła na drodze promieniowania jak i konwekcji wewnątrz przestrzeni pośrednich odzieży wypełnionych powietrzem. Ponadto wymiana ciepła odbywa się na drodze przewodzenia przez materiał, z jakiego wykonana jest odzież. Dla ujednolicenia i uproszczenia obliczeń strat ciepła wprowadzono wielkość Λ_{cl} , która określa całkowity opór przewodzenia ciepła przez warstwę między skórą człowieka a zewnętrzną powierzchnią odzieży [12]. Wielkość ta wyraża się wzorem:

$$\Lambda_{cl} = \frac{R_{cl}}{0,155} \quad clo \quad (2.2)$$

gdzie:

R_{cl} – całkowity opór przewodzenia ciepła od skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, $\frac{m^2 \cdot K}{W}$,

Z wykresu tego wynika, że prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi bliskiej 0 m/s krzywe komfortu cieplnego są niemal pionowe. Jest to wynikiem tego, że proces wymiany ciepła zachodzi wówczas tylko na drodze konwekcji swobodnej. Zatem wymagana temperatura komfortu cieplnego w pomieszczeniach, gdzie prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi jest znikoma (bliska zeru), nie zależy od prędkości. Gdy prędkość ta mieści się w granicach $0,1 \div 0,3$ m/s krzywe komfortu cieplnego mają punkt przegięcia. Oznacza to, że małym zmianom temperatury odpowiadają znaczne zmiany prędkości. W związku z tym wzrost prędkości powietrza musi być zrównoważony wzrostem temperatury. Fanger ocenia, że wzrost prędkości w strefie przebywania ludzi w zakresie $0,1 \div 0,3$ m/s musi być zrównoważony wzrostem temperatury o $1,5^{\circ}\text{C} \div 3^{\circ}\text{C}$.

2.2 Komfort cieplny w obiektach handlowych i usługowych

Klimat w zamkniętym pomieszczeniu definiowany jest jako wielkość charakteryzująca łączny wpływ wszystkich fizycznych parametrów danego pomieszczenia, które mają wpływ na straty i zyski ciepłe organizmu oraz na sposób jego oddychania. Ponadto definicja ta obejmuje także czynniki, które nie są bezpośrednio związane z warunkami cieplnymi, a dotyczą powietrza w pomieszczeniu. Są to [12]:

- skład powietrza,
- zapylenie powietrza,
- zapach powietrza,
- liczba cząsteczek naładowanych elektrycznie (stopień jonizacji),
- ilość mikroorganizmów,

Konieczność zapewnienia komfortu cieplnego spowodowana jest dążeniem ludzi do odczuwania stanu zadowolenia z warunków cieplnych, w jakich aktualnie przebywa [12].

Najważniejszymi pomieszczeniami w obiektach handlowo-usługowych są sale sprzedaży oraz pomieszczenia usługowe dla klientów. Nieświadomie, zwracają oni dużą uwagę na komfort cieplny w tych pomieszczeniach. Takie obiekty, w których klienci dobrze się czują (zarówno pod względem obsługi jak i odczuć cieplnych) mają większe szanse osiągnięcia zysku. Jednakże wymogi szeregu pomieszczeń o różnym przeznaczeniu mogą być zdecydowanie odmienne. Dlatego ważnym jest, aby jeszcze na etapie projektu

prawidłowo podjęte zostały decyzje dotyczące sposobu kształtowania warunków ciepłno - wilgotnościowych zapewniających te odpowiednie warunki przy możliwie małym zużyciu energii. Im wyższy standard pomieszczeń (droższe artykuły), tym wyższe wymagania odnośnie stanu mikroklimatu i niezbędne są wyższe nakłady na kształtowanie mikroklimatu.

Najważniejszymi zmiennymi parametrami powietrza wpływającymi na stan komfortu cieplnego są [14, 30, 12]:

- temperatura powietrza,
- wilgotność względna powietrza,
- względna prędkość przepływu powietrza,
- temperatura powierzchni przegród otaczających,
- jonizacja i zapach powietrza,
- ilość mikroorganizmów,

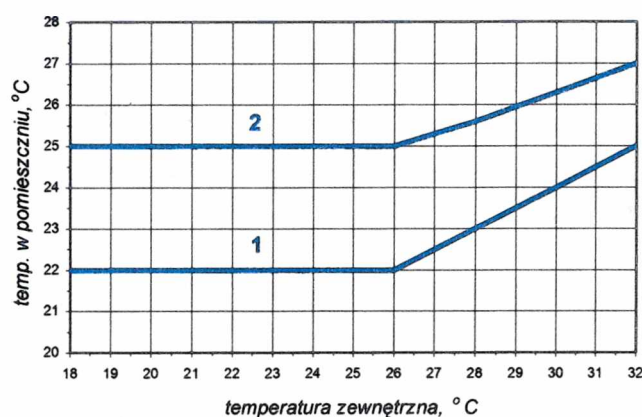
Ponadto na odczucie komfortu w pomieszczeniu mają wpływ takie czynniki jak:

- kolorystyka pomieszczenia,
- wystrój wnętrza,
- zagęszczenie klientów,
- jakość obsługi.

2.2.1. Temperatura powietrza

Wyznaczenie optymalnej temperatury powietrza w pomieszczeniu, w którym przebywają ludzie nie jest rzeczą łatwą, ponieważ zdolności aklimatyzacyjne człowieka ograniczone są przez komfort cieplny, w obrębie którego czuje się on najlepiej. Najwłaściwszą temperaturą w strefie przebywania ludzi jest taka, która zapewnia ciału ludzkiemu równowagę cieplną w otaczającym środowisku. Zatem w zależności od wykonywanej pracy, ubrania, wieku, płci, pory roku, kontaktu z otoczeniem oraz przeznaczenia zakładane temperatury powietrza w pomieszczeniu mogą być różne.

Dla pomieszczeń handlowych i usługowych można przyjąć, że temperatura w pomieszczeniu powinna być taka jak dla pomieszczeń komfortu cieplnego. Zatem powinna zależeć od aktualnej temperatury powietrza zewnętrznego. Na rysunku 2.2. przedstawiono zakres dopuszczalnych temperatur powietrza w pomieszczeniu wg DIN 1946.



Rysunek 2.2. Zakres dopuszczalności temperatury powietrza w pomieszczeniu według DIN 1946 [58].

Rysunek ten przedstawia zakres zalecanych temperatur, które powinny być zapewnione dla zachowania warunków komfortu cieplnego przy lekkiej aktywności ruchowej i normalnym ubraniu.. Wg wytycznych niemieckich zalecaną temperaturą w pomieszczeniu zarówno dla okresu zimowego jak i przejściowego jest temperatura rzędu 22°C. Według DIN 1946 [3],temperatura utrzymywana na tym poziomie jest zalecana zimą nawet dla pomieszczeń, które są przewietrzane przez otwieranie okien. W pomieszczeniach, w których przebywają wyłącznie kobiety, lub w pomieszczeniach, w których znajdują się przymierzalnie lub w salonach kosmetycznych i fryzjerskich temperatura powinna być o kilka stopni wyższa. Jednak nie powinna ona przekraczać maksymalnych wartości ograniczonych krzywą 2.

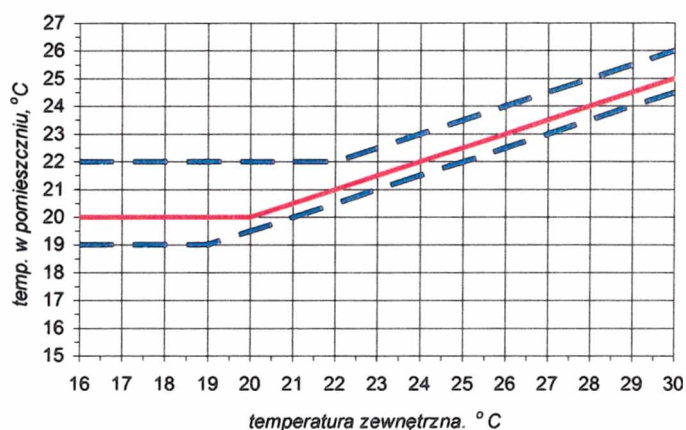
W okresie letnim temperatura w pomieszczeniu powinna być nadążna, za temperaturą zewnętrzną. Wzrost temperatury w pomieszczeniu powinien następować wraz za wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego powyżej ~ 26°C.

W tabeli 2.1 przedstawiono wymagane parametry powietrza w pomieszczeniach handlowych w zależności od ich funkcji. Dane te pochodzą z opracowania [3] i są zgodne z VDI 2082 – grudzień 1988.

Tabela 2.1. Temperatury w wybranych pomieszczeniach handlowych i usługowych wg [58]

Grupa pomieszczeń: sprzedaż, usługi	Temperatura w pomieszczeniu	
	Zimą [°C]	Latem [°C]
Ogólna sprzedaż (materiały włókiennicze, buty, wyroby jubilerskie itp.)	19÷22	22÷26
Słaby ruch klientów np. meble, AGD	19÷22	22÷26
Lampy, radia, telewizory, sprzęt RTV, salony fryzjerskie i kosmetyczne	20÷24	22÷28
Środki spożywcze np.: mięso, ryby, sery, owoce	20÷23	22÷26
Działalność z wydzielaniem intensywnych zapachów (np.: pralnie, szybkie czyszczenie odzieży)	19÷22	22÷26

Wytyczne odnośnie temperatur w pomieszczeniach przedstawiono na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Zakres temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od przyjętej temperatury powietrza w pomieszczeniu dla okresu zimowego. Wg [4] i obowiązujących w Polsce wytycznych obliczeniowych dla klimatyzacji.

Wykres określa temperatury w pomieszczeniach klimatyzowanych w zależności od wymaganej temperatury powietrza w pomieszczeniu w okresie zimowym. Dla Polski wg norm [41,42] optymalna temperatura w pomieszczeniu w okresie zimowym dla pomieszczeń przeznaczonych na stały pobyt ludzi wynosi 20°C. Jednakże w takich pomieszczeniach jak salon kosmetyczny, sklep z przymierzalnią bielizny itp., temperatury w okresie zimowym powinny być wyższe

W pomieszczeniach o znacznych zyskach ciepła od oświetlenia elektrycznego przekraczających 80 W/m^2 , temperatura powietrza winna być odpowiednio niższa tak, aby zniwelowany został wpływ promieniowania na człowieka.

W tabeli 2.2 przedstawiono wymagane temperatury powietrza w salach sprzedaży przy założeniu wilgotności względnej równej 50% [65]. Dane przedstawione w tej tabeli uwzględniają izolacyjność odzieży oraz strumień ciepła całkowitego wydzielanego przez klientów i personel. Należy zwracać uwagę zarówno na aktywność klientów i personelu sklepu jak i na okres czasu spędzanego w danym pomieszczeniu. Fanger w trakcie swoich badań określił, że dla klientów $Q_c = 165 \div 175 \text{ W/os}$, a dla personelu $Q_c = 175 \div 185 \text{ W/os}$. Natomiast Recknagel podaje, że w pomieszczeniach handlowych ludzie oddają do otoczenia ok. 105 W/os. , co wydaje się bliższe prawdy

Tabela 2.2. Parametry powietrza w salach sprzedaży domów towarowych przy $\phi_p \sim 50\%$, $Q_{c(\text{klienci})} = 165 \div 175 \text{ W/os}$, $Q_{c(\text{personel})} = 175 \div 185 \text{ W/os}$ wg. [65].

Rodzaj osób	Parametry powietrza w salach sprzedaży					
	LATO			ZIMA		
	Izolacyjność odzieży:			Izolacyjność odzieży:		
	Klienci: $0,5 \div 0,6 \text{ clo}$ Personel: $0,5 \div 0,6 \text{ clo}$			Klienci: $1,25 \text{ clo}$ Personel: $0,75 \text{ clo}$		
	Temperatura [°C]	Prędkość [m/s]	Wilgotność [%]	Temperatura [°C]	Prędkość [m/s]	Wilgotność [%]
klienci	21,5÷23,5	0,1÷0,4	50÷70	16÷18	0,1÷0,4	~50
personel	21÷23	0,1÷0,35	50÷70	18÷20	0,1÷0,35	~50

W celu porównania wymaganych temperatur w salach sprzedaży dla różnych krajów na świecie w tabeli 2.3. zamieszczono zestawienie wymaganych parametrów powietrza w pomieszczeniu w zależności od pory roku. Dane te mogą służyć do wyznaczenia odpowiednich temperatur w strefie przebywania ludzi salach sprzedaży.

Tabela 2. 3. Przegląd wymaganych parametrów powietrza w salach sprzedaży przyjmowanych w różnych państwach dla warunków w okresie letnim i zimowym, wg [65]

Nazwa kraju	ZIMA		LATO	
	Temperatura w strefie przebywania ludzi	Wilgotność względna w strefie przebywania ludzi	Temperatura w strefie przebywania ludzi	Wilgotność względna w strefie przebywania ludzi
	t_p	ϕ_p	t_p	ϕ_p
	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Anglia	18	55	23	55
Czechy	18÷20	40÷55	22÷26	65÷50
Francja	22÷23	35÷50	26÷27	55÷50
Niemcy	22÷23	35÷50	24÷26	50÷45
Szwajcaria	20÷21	30÷40	26÷27	50÷40
USA	22÷23	35÷50	26÷27	50÷45
Rosja	19÷22	35÷50	23÷27	55÷50
Polska	18÷20	30÷45	23÷26	65÷40

Z tabeli wynika, że zakresy temperatur i wilgotności względnych powietrza w salach sprzedaży są zbliżone dla wszystkich wymienionych państw. W Polsce, Czechach i Anglii wymagane są nieco niższe temperatury zarówno dla okresu zimowego jak i letniego. Jednak wydaje się, iż zestawienie to dotyczy jedynie sal sprzedaży o wysokim standardzie. W naszym kraju w salach sprzedaży w supermarketach utrzymywane są nieco inne parametry. Przedstawione to zostanie w dalszej części pracy.

W Polsce działa już kilkanaście różnych sieci supermarketów, które przy projektowaniu wentylacji/klimatyzacji, korzystają z własnych wytycznych projektowania i eksploatacji.

Zalecane przez poszczególne sieci sklepów parametry powietrza w pomieszczeniach oraz warunki pracy i eksploatacji układów powietrznych przedstawiono w dalszej części opracowania na rysunku 2.4.

W pomieszczeniach handlowych ludzie przebywają w ruchu zatem wahania temperatur w obszarze ich przebywania nie powinny przekraczać ok. 3÷4 K/m [12]. Z uwagi na występujące w każdym pomieszczeniu różnice temperatur w kierunku poziomym

i pionowym, należy tak dobierać m.in. rodzaj ogrzewania, oraz temperatury powierzchni grzejnych, aby te różnice ograniczyć. By to uzyskać należy zapewnić:

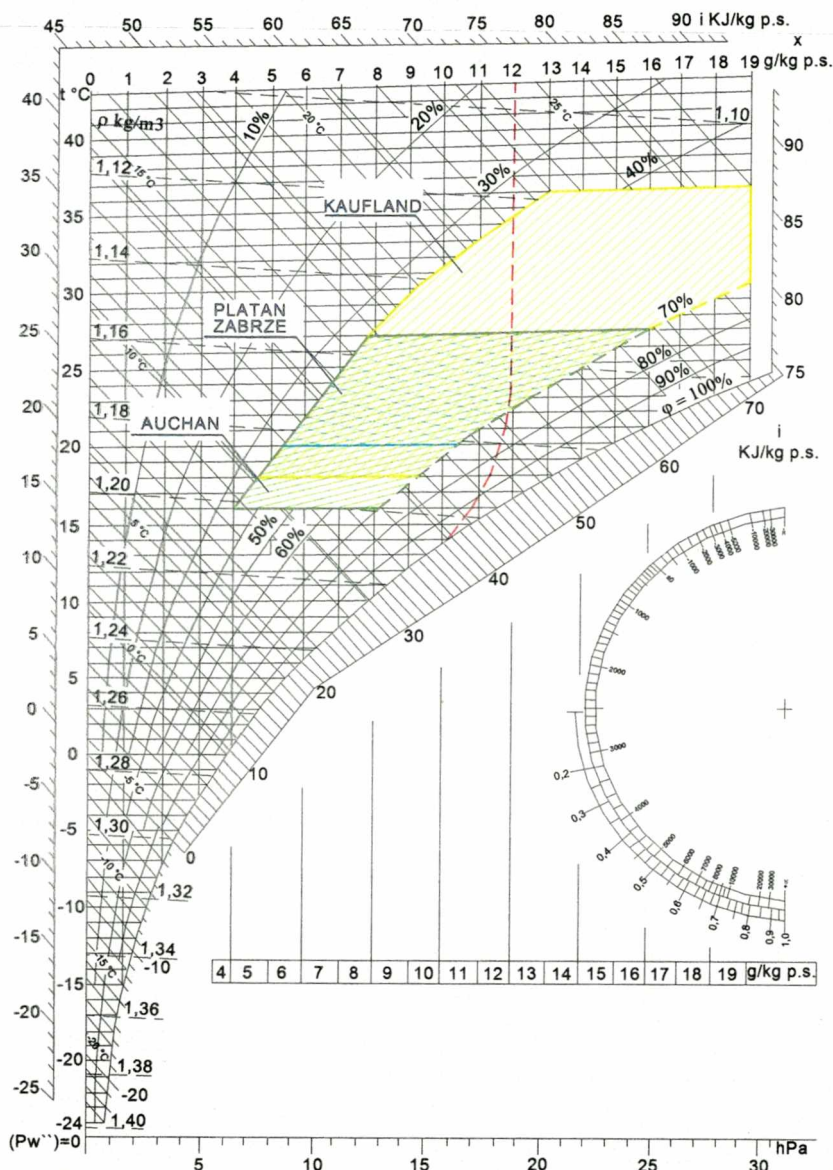
- solidną konstrukcję budynku,
- ocieplenie budynków,
- montaż szczelnych okien,
- stałe, równomierne ogrzewanie pomieszczeń,
- rozwiązania architektoniczne zapobiegające niekontrolowanemu napływowi powietrza zewnętrznego.

2.2.2. Wilgotność względna powietrza

Człowiek oddaje do otoczenia także ciepło odparowania. Wilgotność powietrza w pomieszczeniu wpływa na wartość tego odparowania. Z uwagi na duży zakres termoregulacji organizmu ludzkiego, zakres zmienności wilgotności względnej jest zdecydowanie szerszy od zakresu zmienności temperatury. Wilgotność względna wywiera znaczny wpływ na samopoczucie człowieka dopiero wtedy, kiedy pojawia się konieczność odparowania wody z powierzchni skóry. Jednocześnie, jeżeli w pomieszczeniu panuje bardzo wysoka temperatura i wysoka wilgotność, wówczas zahamowane jest odparowanie wody z powierzchni skóry i człowiek zaczyna się pocić oraz odczuwać duszność.

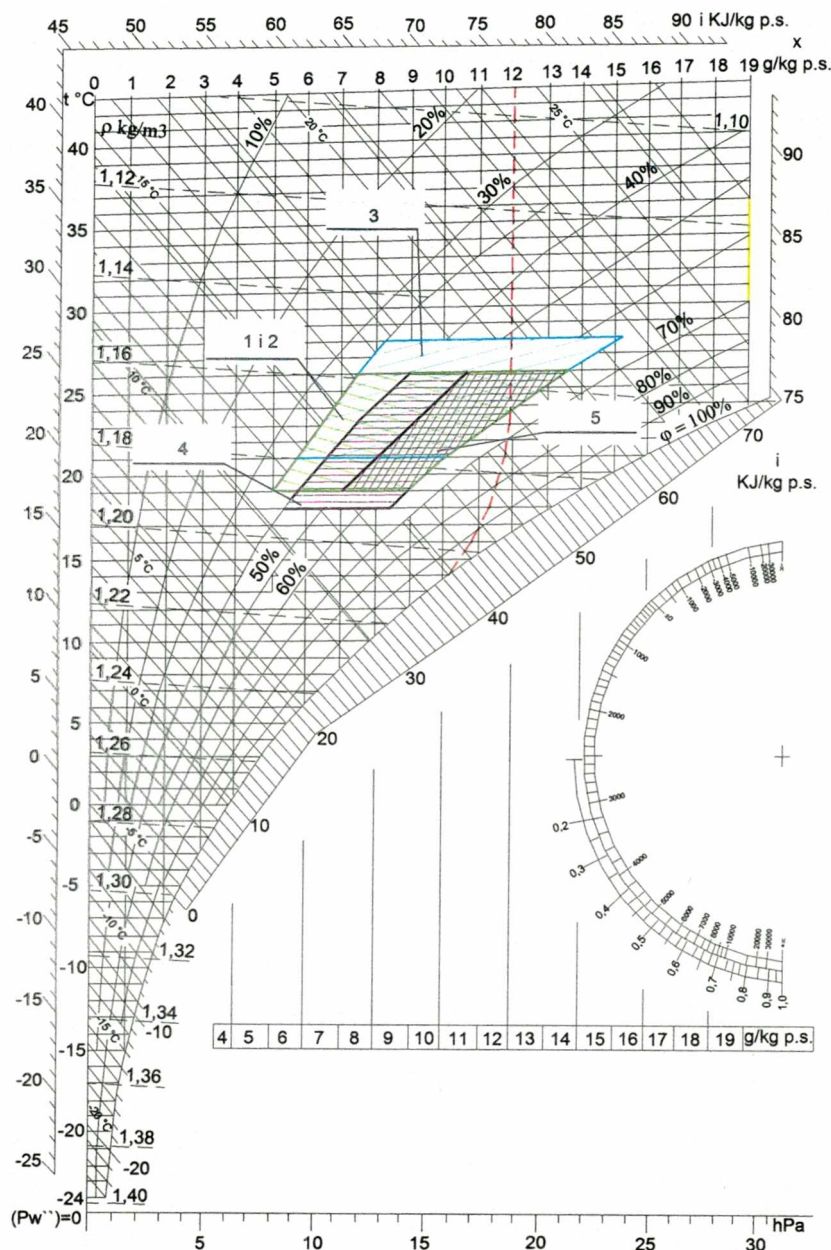
Przy wilgotności względnej niższej niż 35%, (występującej najczęściej zimą), w pomieszczeniach ogrzewanych dochodzi do wysuszenia odzieży, dywanów, mebli, itp. W takim suchym powietrzu unoszą się drobinki pyłu, kurzu. Gdy pył osiada na gorących powierzchniach grzejnych, mogą zachodzić procesy chemiczne, w których może powstawać amoniak, drażniący drogi oddechowe człowieka. Ponadto wszelkiego rodzaju tworzywa sztuczne znajdujące się w pomieszczeniach w wilgotności względnej powietrza mniejszej od 35% ładują się elektrycznie i przyciągają do siebie cząstki kurzu i pyłu. W efekcie dochodzi do wysuszenia błon śluzowych człowieka. Dlatego do pomieszczeń, w których istnieje możliwość spadku wilgotności względnej poniżej wartości 35% należy bezwzględnie dostarczać nawilżone powietrze klimatyzujące. Jeżeli w pomieszczeniach handlowych dopuścimy do spadku wilgotności względnej poniżej zalecanej wartości, klienci będą się źle czuli. Alergicy i osoby wrażliwe na kurz i pył będą starały się unikać tego typu obiektów ze względu na stan swojego zdrowia.

Na rysunku 2.4. na wykresie i-x przedstawiono zakres parametrów powietrza (temperatury i wilgotności względnej) dla pomieszczeń handlowych. Podane na wykresie zakresy parametrów powietrza zaczerpnięto z wytycznych projektowania obowiązujących w poszczególnych sieciach handlowych. Przyjmowane są one jedynie w dużych halach sklepowych w super- i hipermarketach. Wydzielone małe sale (indywidualne sklepy) mogą kierować się wytycznymi indywidualnymi lub ogólnymi.



Rysunek 2.4. Wykres i-x przedstawiający zakresy zalecanych parametrów powietrza w dużych salach sprzedaży. Opracowanie własne, wykonane na podstawie dostępnych materiałów [64]

Natomiast na rysunku 2.5 przedstawiono parametry powietrza w różnych pomieszczeniach handlowych i usługowych podawane w literaturze ogólnej [64].



Rysunek 2.5. Wykres przedstawiający zakresy zalecanych parametrów powietrza w obiektach handlowych i usługowych, wg [58]. 1 – ogólna sprzedaż (materiały włókiennicze, obuwie, wyroby jubilerskie, itp.); 2 – słaby ruch klientów (meble); 3 – RTV, lampy, salony fryzjerskie; 4 – środki spożywcze (mięso, ryby, sery); 5 – działalność z wydzielaniem intensywnych zapachów.

Z przedstawionych rysunków wynika, jak różne są zakresy parametrów powietrza dla dużych sal sprzedaży w supermarketach oraz dla małych sklepów o wyższym standardzie. Zdecydowanie różne parametry przedstawiono na rysunku 2.4. i 2.5. Wyraźnie widać na nich to co charakterystyczne współczesnych obiektów handlowych - im niższe ceny tym gorsze warunki mikroklimatu w pomieszczeniach.

2.2.3. Prędkość przepływu powietrza

Prędkość przepływu powietrza w strefie przebywania ludzi ma istotny wpływ na odczucia cieplne przebywających w nim osób. Podobne prędkości powietrza na wolnym powietrzu nie dają odczucia dyskomfortu natomiast w pomieszczeniach najczęściej odczuwane są jako nieprzyjemne. Wynika to najczęściej z tego, iż przy niskich temperaturach powietrza nawiewanego nawet bardzo niskie prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi dają odczucie dużego dyskomfortu. Ludzie marzną. Natomiast w sytuacjach, kiedy temperatura powietrza nawiewanego jest wyższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu tego odczucia nie stwierdza się. Duże prędkości powietrza przy wyższych temperaturach w pomieszczeniu odczuwane są nawet jako przyjemne. Zatem należy dążyć do zharmonizowania prędkości powietrza z jego temperaturą w pomieszczeniu.

Najtrudniejszym jest określenie związku pomiędzy prędkością powietrza oraz różnicą temperatur powietrza w strefie przebywania ludzi tak, aby nie pojawiło się w nim zjawisko zwane przeciągiem. J. Rydberg określił zdolność chłodzącą strumienia powietrza jako wzajemny związek prędkości powietrza oraz różnicy temperatury między średnią temperaturą w strefie przebywania ludzi i powietrza nawiewanego dopływającego do strefy.

$$g_x = (t_p - t_x) + 8v_x = \Delta t_x + 8v_x \quad (2.3)$$

gdzie:

t_p – temperatura powietrza w strefie przebywania ludzi, °C,

t_x – temperatura powietrza w osi strumienia w odległości x od elementu nawiewnego, °C,

v_x – końcowa prędkość powietrza w osi strumienia w odległości x od wylotu, m/s.

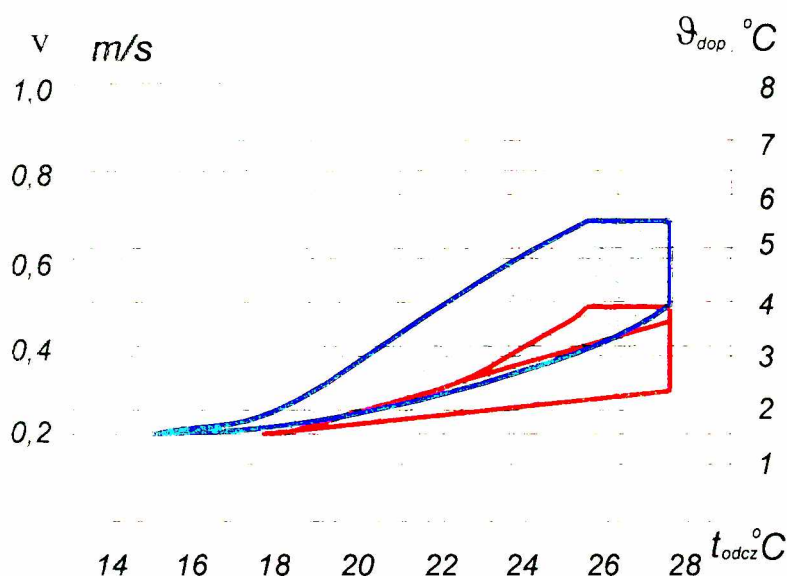
g_x – siła chłodząca strumienia powietrza nawiewanego (wskaźnik odczuwania przeciągu).

Na rysunku 2.6. przedstawiono dopuszczalne wartości zdolności chłodzącej ϑ_{dop} w zależności od temperatury i dopuszczalnej prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi. Wykres został sporządzony dla warunków, występujących w pomieszczeniach klimatyzowanych tzn.: przy założeniu, że temperatura powietrza nawiewanego w jego końcowej fazie jest równa temperaturze powietrza w strefie przebywania ludzi. Z założenia tego wynika, że:

$$\vartheta_{dop} = 8v_r \quad (2.4)$$

w którym:

v_r – dopuszczalna prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi, m/s.



Rysunek 2.6. Wykres dopuszczalnej zdolności chłodzącej pomieszczenia w zależności od temperatury i prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi, wg [30].

Ponadto obrazuje on zdolność chłodzącą dla ludzi wykonujących prace lekka i średnią, z którymi to rodzajami aktywności mamy do czynienia w typowych obiektach handlowych i usługowych.

Prawidłowe jest przyjmowanie prędkości powietrza w granicach $0,15 \div 0,5$ m/s przy temperaturach typowych dla pomieszczeń handlowych. Jednak określenie prędkości

powietrza w strefie przebywania ludzi musi być bezpośrednio powiązane z temperaturami powietrza w pomieszczeniu. Ważnym jest ponadto prawidłowe określenie stopnia turbulencji powietrza w pomieszczeniu. Jego brak może, pomimo teoretycznie prawidłowo przyjętych prędkości w strefie przebywania ludzi przyczynić się do wzrostu liczby niezadowolonych z warunków mikroklimatu.

Istotnym jest uwzględnienie rodzaju i przeznaczenia pomieszczenia, gdyż zdecydowanie inne parametry prędkości powietrza w strefie przyjmuje się w pomieszczeniach usługowych (fryzjer, kosmetyczka) i pomieszczeniach handlowych (sale sprzedaży).

2.2.4. Temperatura płaszczyzn otaczających

Temperatura płaszczyzn otaczających jest najczęściej niższa od temperatury powierzchni skóry. Wówczas organizm ludzki oddaje ciepło na drodze promieniowania. Utrata ciepła na drodze promieniowania nie powinna przekraczać pewnej określonej wartości [14]. W celu określenia wpływu temperatur powierzchni otaczających na odczucia komfortu cieplnego wprowadzono pojęcie „temperatury odczuwalnej”, którą określa się zależnością:

$$t_{od} = \frac{t_o + t_p}{2}, \quad (2.5)$$

gdzie

t_{od} – temperatura odczuwalna, K,

t_o – średnia temperatura płaszczyzn otaczających, K,

t_p – temperatura powietrza w pomieszczeniu, K,

Aby temperatura odczuwalna była zbliżona do wymaganej temperatury w pomieszczeniu określonej na podstawie wymagań komfortu cieplnego, temperatura płaszczyzn otaczających powinna być w przybliżeniu równa temperaturze powietrza w pomieszczeniu.

Temperatura powierzchni otaczających może być obliczana z zależności [3]:

$$t_o = \frac{\sum A_i \cdot t_i}{\sum A_i}, \quad (2.6)$$

gdzie

A_i – powierzchnia i-tej przegrody, m^2 ,

t_i – temperatura i-tej przegrody, K,

Dla zapewnienia w pomieszczeniach prawidłowych warunków komfortu cieplnego należy dążyć do uzyskania średniej temperatury przegród otaczających bliskiej temperaturze powietrza.

2.2.5. Jonizacja powietrza

Pomiędzy jonosferą rozpoczynającą się na wysokości ok. 60÷80 km a powierzchnią Ziemi istnieje tzw. *elektrostatyczne pole prądu stałego* [3]. Jego natężenie w pobliżu kuli ziemskiej wynosi ok. 100÷150 V/m. Jednak w zależności od pogody oraz pory roku natężenie to znacznie się zmienia. Prąd skierowany ku Ziemi naładowanej ujemnie podlega silnym wahaniom.

Powstające w pomieszczeniach pola elektryczne wytwarzane są przez ruch osób, tworzywa sztuczne, pokrycia elementów wystroju wnętrz itp. Fanger [12] twierdzi, że nieprawidłowa jonizacja ma niekorzystny wpływ na samopoczucie człowieka. Tymczasem Recknagel [58] pisze, że jony ujemne mają korzystny wpływ na człowieka, gdyż wykazują działanie stymulacyjne.

Zatem ważnym jest zachowanie w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie pewnej równowagi jonów. W pomieszczeniach zadymionych i zakurzonych istnieje niekorzystna przewaga jonów dodatnich.

Z uwagi na brak możliwości prawidłowego kształtowania zawartości jonów ujemnych i dodatnich w pomieszczeniach (zbyt mała wiedza na ten temat) najważniejszym jest zapewnienie jak najmniejszego zadymienia i zapylenia pomieszczeń, w których przebywają ludzie [3].

3. ROZDZIAŁ POWIETRZA W POMIESZCZENIACH

3.1 Ogólne zasady organizowania wymiany powietrza

Dla uzyskania efektywnej wentylacji/klimatyzacji muszą być spełnione następujące warunki [14]:

1. powietrze powinno być usunięte z pomieszczenia dopiero po zasymilowaniu zanieczyszczeń (stężenia substancji, temperatury, wilgotności) przyjętych do wyznaczeniu strumienia powietrza wentylującego lub klimatyzującego;
2. cała strefa przebywania ludzi musi być stale omywana przez powietrze wentylujące;
3. wymiana powietrza w pomieszczeniach wentylowanych i klimatyzowanych musi odbywać się w sposób kontrolowany;
4. muszą być stworzone odpowiednie pola prędkości, przy których projektowaniu szczególną uwagę należy zwrócić na [12]:
 - charakterystyczne cechy strumieni nawiewnych (w tym na ich kierunek);
 - sposób usytuowania otworów nawiewnych i wywiewnych;
 - dopuszczalną różnicę temperatur powietrza nawiewanego i powietrza w pomieszczeniu;
 - źródła emisji i pochłaniania ciepła.

3.2 Strumienie powietrza

Po wypływie powietrza do pomieszczenia (wypełnionego powietrzem) staje się tzw. strumieniem zatopionym. Strumienie powietrza mogą być swobodne lub ograniczone. Strumienie swobodne rozwijają się w ośrodku powietrznym będącym w stanie względnego bezruchu oraz w przestrzeni nieograniczonej powierzchniami przegród budowlanych [30]. Strumienie półograniczone natomiast rozwijają się wzdłuż ściany lub sufitu, są zatem jednostronnie ograniczone. Ponadto jeżeli temperatura powietrza w pomieszczeniu równa jest temperaturze powietrza nawiewanego wówczas mówi się o strumieniach izotermicznych. W przeciwnym wypadku o strumieniach nieizotermicznych.

W wentylacji i klimatyzacji bardzo często występują strumienie, których wektory prędkości wypływu są wzajemnie równoległe. Jeżeli wektory te tworzą między sobą pewien kąt, wówczas mówi się o strumieniach rozproszonych.

Niezależnie od tego, jaki strumień powietrza dostarczany jest do pomieszczenia, najczęściej ma on charakter burzliwy (z wyjątkiem wypływów laminarnych, wyporowych czy stropów perforowanych). Wówczas, w strudze nawiewnej występuje ruch cząsteczek w wielu kierunkach. Cząsteczki znajdujące się na granicy strugi, posiadające energię, przenoszą ją do ośrodka prawie nieruchomego (powietrze w pomieszczeniu). Tym samym powodują wzrost ruchu cząstek powietrza w pomieszczeniu w kierunku strumienia nawiewanego. Następuje indukcja powietrza z pomieszczenia do powietrza nawiewanego, wzrost objętości strumienia oraz zmiana jego parametrów (np.: temperatury i wilgotności).

Klasyczne teorie strug nawiewnych dotyczą izotermicznych strumieni swobodnych wpływających z otworów nieuzbrojonych.

3.3. Wpływ powietrza z niezasłoniętych otworów kołowych, kwadratowych i prostokątnych

Typowym rozwiązaniem otworu nawiewnego, dla którego opracowano klasyczne teorie zachowania się strumienia swobodnego jest dysza z zaokrąglonymi krawędziami [30]. Na rysunku 3.1 przedstawiono układ stref przepływu oraz przebieg zmian prędkości osiowej w funkcji odległości od takiego wylotu.

Zależność maksymalnej prędkości osiowej od odległości od wylotu dla strefy głównej wg [30] może być określona równaniem:

$$v_x^{\max} = 6 \cdot v_0 \cdot \frac{d}{x} \quad (3.1)$$

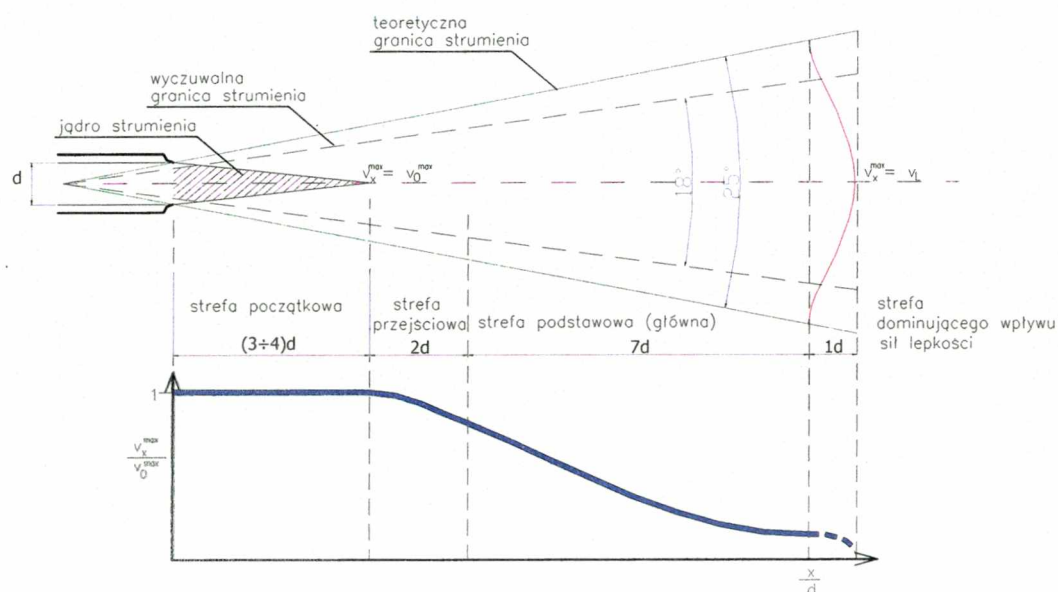
gdzie:

$v_x^{\max}$ - prędkość osiowa strumienia w odległości x od wylotu, m/s;

v_0 - prędkość wypływu powietrza w dyszy, m/s;

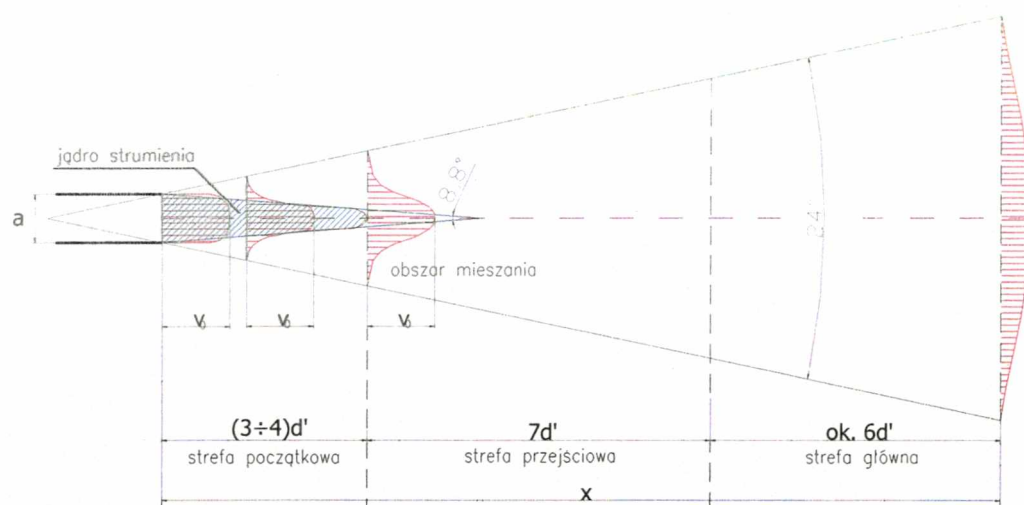
d - średnica otworu dyszy;

x - odległość od wylotu, m.



Rys. 3.1 Układ stref przepływu w swobodnym izotermicznym strumieniu powietrza wypływającym z otworu dyszowego wg [30,55]

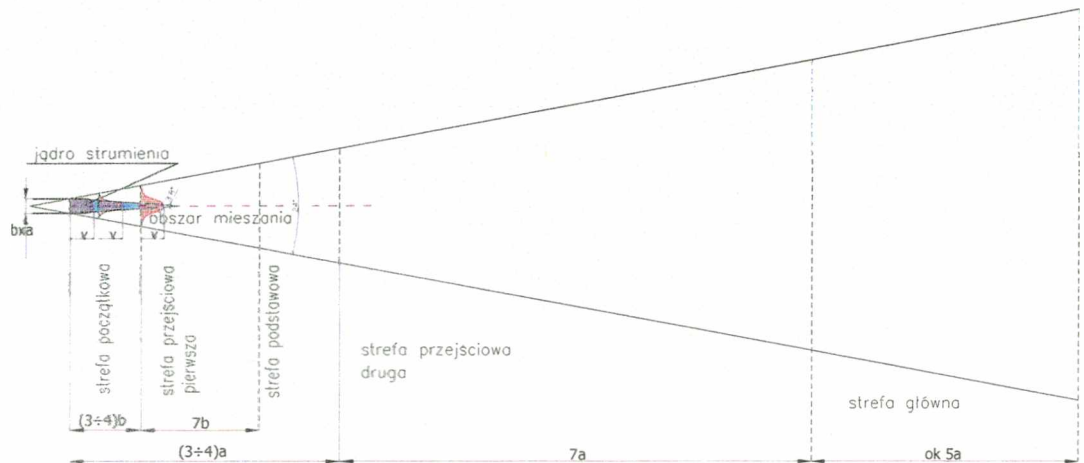
Dla otworów kwadratowych układ stref wypływu wygląda jak to pokazano na rysunku 3.2.



Rys. 3.2 Układ stref przepływu w swobodnym izotermicznym strumieniu powietrza wypływającym z otworów kwadratowych wg [14]

Na rysunku 3.3 przedstawiono schemat strumienia swobodnego wypływającego z otworu prostokątnego. Z innym podziałem stref przejściowej i głównej. Przekroje poprzeczne strumieni wypływających z otworów kwadratowych i prostokątnych

szybko zaokrąglają się i już w niewielkiej odległości od wylotu przybierają kształt kołowy. Dlatego względne długości poszczególnych stref zarówno dla otworów kołowych jak i kwadratowych są takie same. Wymiarem odniesienia dla otworów kwadratowych jest średnica o powierzchni równoważnej.



Rys. 3.3 Układ stref przepływu w swobodnym izotermicznym strumieniu powietrza wypływającym z otworów kwadratowych wg [14]

Zmiana prędkości osiowej dla otworów kwadratowych i prostokątnych w strefie podstawowej następuje odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z odległości od otworu. W strefie głównej odwrotnie proporcjonalnie do tej odległości. W opracowaniu [55] przytoczono ogólną formułę (3.2) pozwalającą określić wartość prędkości osiowej zarówno dla nieuzbrojonych jak i uzbrojonych otworów nawiewnych w strefie głównej. Zależność (3.2) może być stosowana dla otworów okrągłych, kwadratowych, prostokątnych ($b/a = 1/25$) oraz dla długich szczelin ($b/a \leq 1/40$).

$$v_x = C \frac{v_{om} \sqrt{F}}{x \sqrt{\alpha \cdot \varepsilon}} \quad (3.2)$$

gdzie:

v_x - prędkość osiowa w odległości x od otworu wylotowego, m/s;

v_{om} - średnia prędkość w przekroju brutto otworu wylotowego, m/s;

C - stała zależna od burzliwości strumienia w otworze wylotowym.

x - odległość od otworu wylotowego, m;

α - współczynnik kontrakcji; dla otworów o ostrych krawędziach $\alpha = 0,61$, a dla zaokrąglonych krawędziach $\alpha = 0,95$;

ε - stosunek wolnej powierzchni dla przepływu powietrza do powierzchni otworu wylotowego brutto;

Inne opracowania [1] bazujące na zdecydowanie szerszym materiale badawczym podają formuły matematyczne dla wszystkich stref przepływu strumienia powietrza wypływającego z otworów kołowych. W tabeli 3.1 przedstawiono formuły, które pozwalają w sposób dość ogólny określić zależność maksymalnych prędkości względnych w funkcji odległości od wylotu dla niezasłoniętych otworów o różnej geometrii.

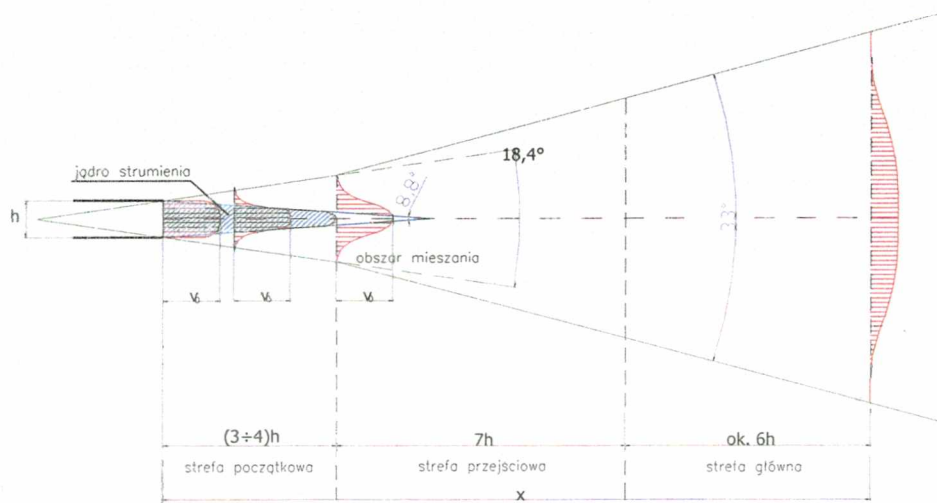
Tabela 3.1. Zależności maksymalnych prędkości względnych od odległości oraz prędkości w otworze wylotowym wg[1]

Strefa przepływu powietrza	Ogólna formuła matematyczna	Nr zależności
Strefa początkowa	$v_x^{\max} = v_0$	3.3
Strefa przejściowa	$v_x^{\max} \propto \frac{v_0}{x^n}$	3.4
Strefa podstawowa (główna)	$v_x^{\max} \propto \frac{v_0}{x}$	3.5
Strefa dominującego wpływu sił lepkości	$v_x^{\max} \propto \frac{v_0}{x^2}$	3.6

Jak widać zależności opisane wzorem 3.1, 3.2 oraz 3.5 są podobne. Generalnie świadczą one o tym, że maksymalna prędkość osiowa jest w strefie głównej – najważniejszej z punktu wentylacji - wprost proporcjonalna do prędkości w otworze natomiast odwrotnie proporcjonalna do odległości. W strefie początkowej prędkość osiowa jest równa prędkości wypływu, natomiast w strefie przejściowej –najtrudniejszej do określenia, z uwagi na proces ustalania się właściwego rozkładu prędkości – maksymalna prędkość osiowa jest odwrotnie proporcjonalna do odległości w potęgze n . Wykładnik ten może przyjmować wartości od 0,33 do 1 – zależnie od kształtu otworu wylotowego (od wysokości i szerokości otworu).

3.4. Wpływ powietrza ze szczelin o długości nieskończonej

Na rysunku 3.4 przedstawiono schemat strumienia swobodnego wypływającego ze szczeliny o długości nieskończonej.



Rys. 3.4. Układ stref przepływu w swobodnym izotermicznym strumieniu powietrza wypływającym ze szczeliny o długości nieskończonej wg [14]

Powietrze wypływające ze szczeliny o długości nieskończonej tworzy strumień płaski. Ma on, w przedstawionym przekroju, budowę podobną do strumienia stożkowego. Dla tego strumienia wyróżnia się dwa kąty graniczne. Mniejszy z nich ogranicza strugę w obszarze strefy przejściowej, natomiast większy - w obszarze strefy głównej. Z uwagi na to, iż strumień płaski zasilany jest z dwóch stron, spadek prędkości zachodzi w nim zdecydowanie wolniej niż w strugach stożkowych. Dla strug płaskich prędkość osiową w strefie głównej wyznaczyć można z zależności [14]:

$$v_x = v_{om} \sqrt{\frac{C \cdot h}{x \cdot \alpha \cdot \varepsilon}} \quad (3.7)$$

gdzie:

v_x - prędkość osiowa w odległości x od otworu wylotowego, m/s;

v_{om} - średnia prędkość w przekroju brutto otworu wylotowego, m/s;

C – stała zależna od burzliwości strumienia w otworze wylotowym.

x - odległość od otworu wylotowego, m;

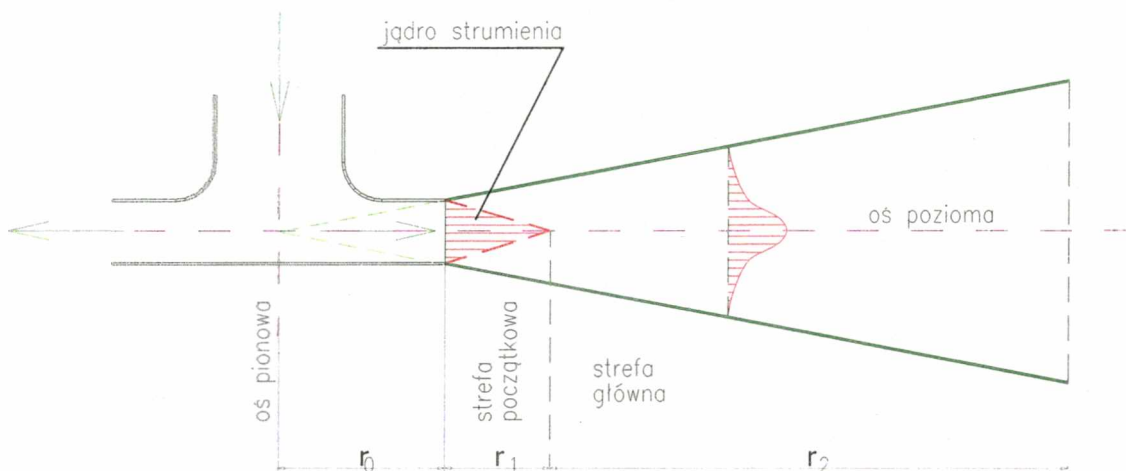
α - współczynnik kontrakcji; dla otworów o ostrych krawędziach $\alpha = 0,61$, o zaokrąglonych krawędziach $\alpha = 0,95$;

ϵ - stosunek wolnej powierzchni dla przepływu powietrza do powierzchni otworu wylotowego;

h – wysokość szczeliny, m.

3.5. Promieniowy wypływ powietrza

W przypadku wypływu powietrza z przestrzeni zawartej między dwoma tarczami (jak na rysunku 3.5) występuje strumień wachlarzowy (promieniowy).



Rys. 3.5. Układ stref przepływu w swobodnym izotermicznym strumieniu wachlarzowym wg [1]

Taki rodzaj strug nawiewnych w literaturze dotyczy przede wszystkim otworów nieuzbrojonych. Ponadto, jak to widać na przedstawionym rysunku, nawiew wachlarzowy następuje z elementu posiadającego odcinek prosty, na którym powietrze stabilizuje swój ruch. W otworze wylotowym prędkość składa się jedynie z wektorów prędkości osiowej i niezauważalny jest ruch cząstek powietrza w innych kierunkach. Dopiero w pewnej odległości od otworu nawiewnego zauważa się podział prędkości na składowe osiowe i pionowe.

Dla tak uformowanych nawiewów pierścieniowych w strefie głównej prędkości osiowe obliczyć można z kilku formuł matematycznych.

1. Wg Tollmiena [1]

$$v_x = 2,47v_0 \left(\frac{r}{h} \right) \sqrt{\frac{r_0}{h}} \quad (3.8)$$

gdzie:

v_x - prędkość osiowa w odległości r od otworu wylotowego, m/s;

v_0 - średnia prędkość w przekroju brutto otworu wylotowego, m/s;

r - odległość od nawiewnika, m;

h - wysokość otworu nawiewnego, m.

2. Wg Bechera [1]

$$v_x = 2,2v_0 \sqrt{\left(\frac{r_0 \cdot h}{r(r-r_0)} \right)} \quad (3.9)$$

gdzie:

v_x - prędkość osiowa w odległości r od otworu wylotowego, m/s;

v_0 - średnia prędkość w przekroju brutto otworu wylotowego, m/s;

r - odległość od nawiewnika, m;

h - wysokość otworu nawiewnego, m.

3. Wg Ferencowicza [14]

$$v_x = 2,8v_0 \sqrt{\left(\frac{r_0 \cdot h}{r(r+r_0)} \right)} \quad (3.10)$$

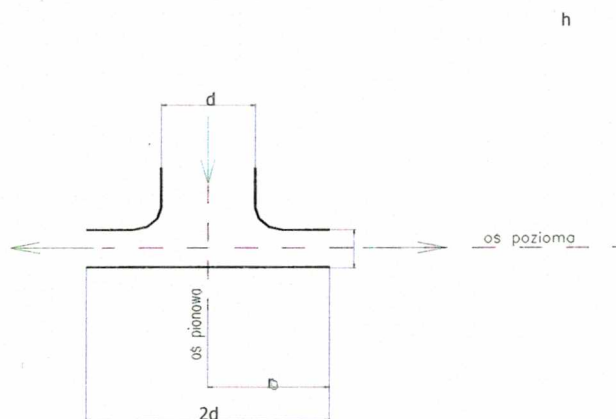
pozostałe oznaczenia jak dla 3.9.

4. Wg Baturina [1]

$$v_x = \frac{0,72v_0}{\sqrt{\left(\frac{r}{d} \right) \cdot \left(\frac{r}{d} + 1 \right)}} \quad (3.11)$$

Oznaczenia jak dla 3.9.

Formuła 3.11 dotyczy maksymalnych prędkości osiowych w odległości $r > 0,5d$. Ponadto zależność ta wyprowadzona została dla nawiewników pierścieniowych o budowie przedstawionej na rysunku 3.6

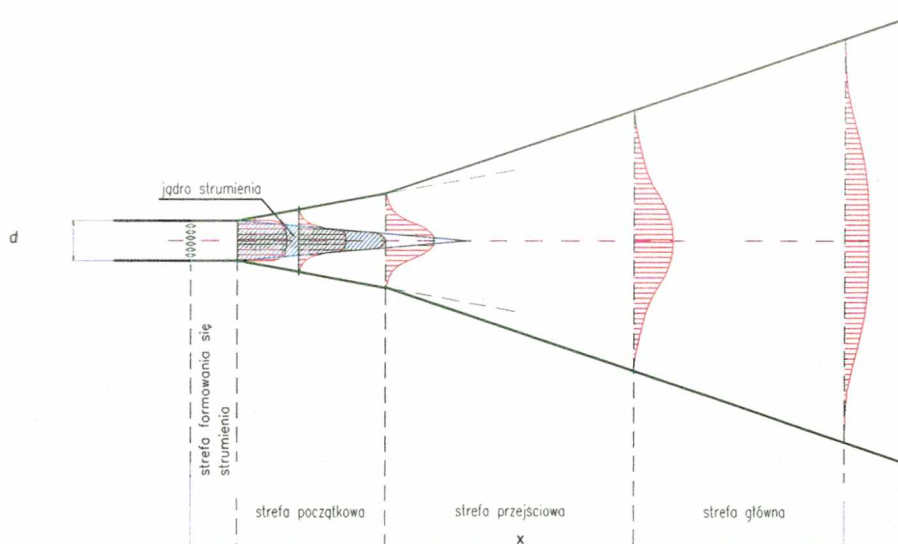


Rys. 3.6. Budowa typowego nawiewnika promieniowego

Wszystkie przedstawione formuły wyprowadzone zostały niezależnie, różnią się w bardzo niewielkim stopniu i mogą być stosowane w projektowaniu. Niestety dotyczą one jedynie otworów nieosłoniętych o konstrukcji jak na rysunku 3.5. Dla innego rodzaju nawiewników promieniowych w dostępnej literaturze, brak jest formuł opisujących omawiane zjawisko.

3.6. Strumienie powietrza wypływające z płaskich otworów przesłoniętych

Na rysunku 3.7. przedstawiono schemat strumienia wypływającego z otworu przesłoniętego.



Rys. 3.7. Schemat strumienia wypływającego z otworów przesłoniętych (uzbrojonych) [14].

W tym przypadku struga nawiewna dzieli się na IV strefy, jak to pokazano na rysunku. Za strefą formowania się strumienia, pojawia się strefa początkowa, w której prędkość osiowa jest równa prędkości w otworze. Następnie występują kolejno strefa przejściowa oraz strefa główna, w których prędkości osiowe są opisywane zależnościami podanymi w tabeli 3.1.

3.7. Indukcja powietrza z pomieszczenia przez strugi nawiewne

Każdy strumień powietrza po opuszczeniu otworu nawiewnego indukuje powietrze z pomieszczenia – wzrasta jego objętość. Jest to związane z ruchem cząstek powietrza w strefie granicznej między strugą nawiewną a powietrzem w pomieszczeniu. Zatem w miarę wzrostu odległości od otworu nawiewnego przemieszczający się w pomieszczeniu strumień powietrza wzrasta. Zjawisko to określane jest jako indukcja. Nazwa tą określa się także zjawisko powstawania strumieni wtórnych, wywołanych przez ejekcyjne działanie strumienia nawiewnego. Zasilają one strumień nawiewny i noszą nazwę strumieni indukowanych. W literaturze [14] przedstawiono wiele formuł pozwalających obliczyć wydatek strumienia powietrza (V_x) płynącego w pomieszczeniu, w odległości x od otworu nawiewnego. Przykładowe wzory zamieszczono w dalszej części opracowania.

1. Otwory kołowe, kwadratowe i prostokątne

$$V_x = \frac{2 \cdot V_0 \cdot x}{C \sqrt{F \cdot \alpha \cdot \varepsilon}} \quad (3.12)$$

gdzie:

V_x - strumień powietrza w odległości x od otworu wylotowego, m^3/s ;

V_0 - strumień powietrza w przekroju brutto otworu wylotowego, m^3/s ;

C – stała zależna od burzliwości strumienia w otworze wylotowym.

x - odległość od otworu wylotowego, m ;

α - współczynnik kontrakcji; dla otworów o ostrych krawędziach $\alpha = 0,61$, o zaokrąglonych krawędziach $\alpha = 0,95$;

ε - stosunek wolnej powierzchni dla przepływu powietrza do powierzchni otworu wylotowego;

2. Szczeliny o długości nieskończonej

$$V_x = V_0 \sqrt{\frac{2}{C}} \cdot \sqrt{\frac{x}{h \cdot \alpha \cdot \varepsilon}} \quad (3.13)$$

Oznaczenia jak w 3.12.

h – wysokość szczeliny, m.

Miarą przenoszenia powietrza z pomieszczenia przez powietrze nawiewane w strumieniu swobodnym jest stopień indukcji „ i ”, który oblicza się ze wzoru:

$$i = \frac{V_x - V_0}{V_0} \quad (3.14)$$

Lub stopień zmieszania:

$$i - 1 = \frac{V_x}{V_0} \quad (3.15)$$

gdzie:

V_x - strumień powietrza w odległości x od otworu wylotowego, m^3/s ;

V_0 - strumień powietrza w przekroju brutto otworu wylotowego, m^3/s .

3.8. Strugi nieizotermiczne

Z reguły temperatura powietrza w pomieszczeniu różni się od temperatury powietrza nawiewanego. Wskutek różnicy temperatur – różnicy gęstości – zachodzi odchylenie osi strumienia. Dokładne określenie kształtu oraz odchylania może zostać wyznaczone na podstawie liczby Archimedes’a uwzględniającej wzajemne oddziaływanie sił wyporu i bezwładności. [14], opisanej formułą,

$$Ar = g \frac{(t_0 - t_s) d_0}{T_s v_0^2} \quad (3.16)$$

W wyrażeniu tym oznaczono:

Ar – liczba Archimedes’a;

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

t_0 – początkowa temperatura strumienia, $^{\circ}\text{C}$;

t_s - temperatura powietrza otaczającego, $^{\circ}\text{C}$;

T_s – bezwzględna temperatura powietrza otaczającego, K ;

v_0 – początkowa prędkość osiowa, m/s ;

d_0 – średnica otworu kołowego o takiej samej powierzchni otworu jak otwór wylotowy, m.

Istotnym jest, że przy tym samym strumieniu nawiewanego, prędkości oraz różnicy temperatur, strumień powietrza wypływającego z otworu nie zasłoniętego będzie charakteryzował się zawsze mniejszą liczbą Archimedesesa [30] niż strumień wypływający z otworu przesłoniętego. Zatem strumienie wypływające z otworów przesłoniętych charakteryzują się mniejszą bezwładnością, a co za tym idzie, wpływ sił Archimedesesa jest tu o wiele większy. Siły wyporu powodują w strumieniach powietrza nawiewanego:

- a) odchylenie strumienia od osi poziomej w górę (gdy temperatura powietrza nawiewanego jest wyższa od temperatury otoczenia) lub w dół (gdy temperatura powietrza nawiewanego jest niższa od temperatury otoczenia), od osi poziomej;
- b) przyklejanie lub odrywanie się strumienia płynącego wzdłuż poziomej lub pionowej przegrody;
- c) zwiększanie lub zmniejszanie zasięgu strumienia powietrza.

Zatem każdorazowo należy sprawdzać wpływ sił Archimedesesa na strumień powietrza nawiewanego wprowadzany do pomieszczenia. Nie stosowanie się do zaleceń może powodować niekorzystne zjawisko przeciągów w pomieszczeniu wentylowanym lub klimatyzowanym.

3.9. Strugi ograniczone

Jeżeli wylot powietrza przylega bezpośrednio do ściany lub stropu wówczas mamy do czynienia ze strugami ograniczonymi. Strumień powietrza ślizga się po ograniczającej go przegrodzie i charakteryzuje się [14]:

- a) zmniejszeniem zdolności mieszania się z powietrzem z otoczenia,
- b) wolniejszym spadkiem prędkości osiowej, a więc większym zasięgiem strumienia,
- c) wolniejszym wyrównaniem różnicy temperatur,
- d) taką samą indukcją w strefie formowania się strumienia jak w przypadku strug nieograniczonych.

Zjawiska te muszą być także uwzględniane przy projektowaniu organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu, gdyż ich nieuwzględnienie może powodować następujące zjawiska w strefie przebywania ludzi:

- a) zbyt wysokie prędkości,
- b) nierównomierne omywanie (strefy martwe, strefy podwyższonej prędkości),
- c) zbyt niskie lub wysokie temperatury,
- d) nierównomierny rozkład temperatur.

Istotna jest temperatura przegród ograniczających. Jeżeli strumień porusza się wzdłuż przegrody poziomej o niższej temperaturze, wówczas w skutek ochłodzenia strumień powietrza może się odkleić od przegrody. Jeżeli natomiast strumień porusza się ku dołowi wzdłuż chłodniejszej przegrody pionowej wówczas jego zasięg, na skutek obniżenia się temperatury powietrza, jest jeszcze większy.

3.10 Organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniach handlowych

Jak już wspomniano w pomieszczeniach użyteczności publicznej o stanie komfortu cieplnego decydują przede wszystkim temperatura, wilgotność względna, ruch powietrza, jego kierunek i hałas. Nieprawidłowe kształtowanie tych parametrów powoduje nieprawidłowe odczucia cieplne. Osoby przebywające w źle klimatyzowanym bądź wentylowanym pomieszczeniu mogą nawet odczuwać zaduch lub przeciągi.

Przeciąg określa się jako prąd powietrzny w strefie przebywania ludzi, którego temperatura, wilgotność względna oraz prędkość odbierają więcej ciepła z powierzchni ciała ludzkiego niż jest to potrzebne w warunkach komfortu cieplnego. Uczucie to może być spotęgowane nieodpowiednim kierunkiem strumienia powietrza. Jeżeli chłodne powietrze kierowane jest na plecy, lub w okolice szyi wówczas człowiek odczuwa wyraźny dyskomfort.

Gdy natomiast w pomieszczeniu, w strefie przebywania ludzi, panuje zbyt wysoka temperatura a prędkość powietrza jest mała, wówczas odczuwa się tzw. zaduch.

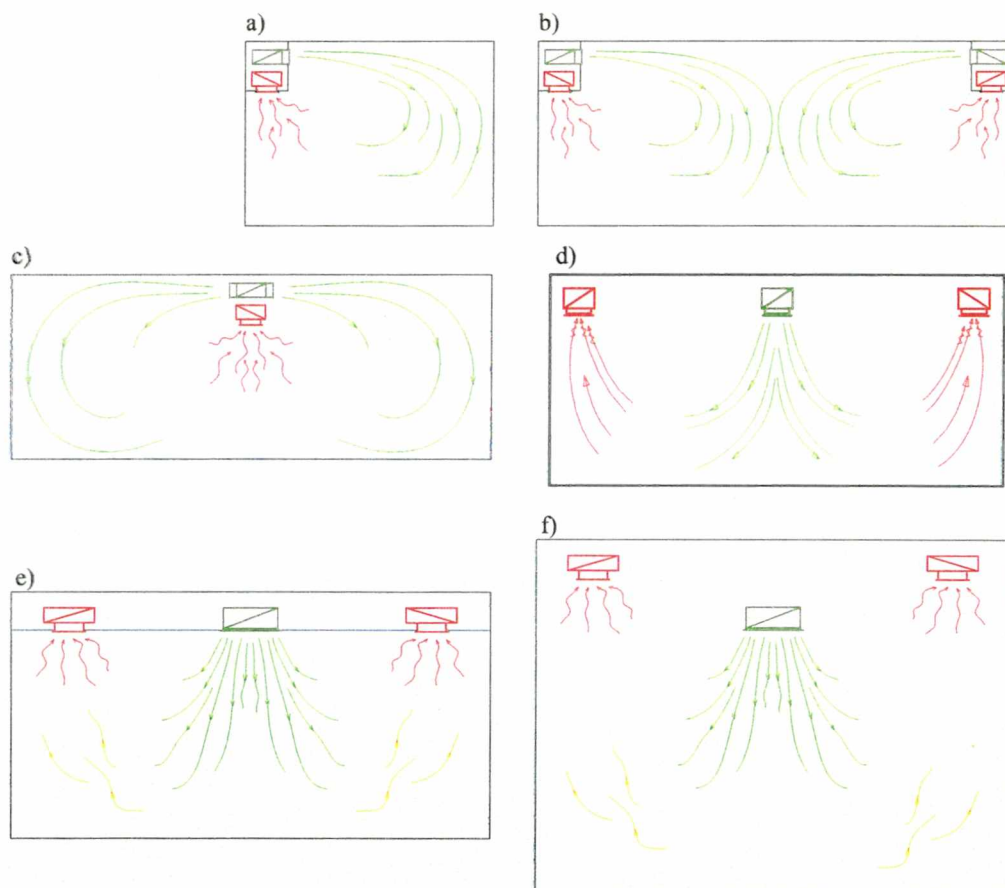
Z uwagi na powyższe prawidłowy rozdział powietrza w pomieszczeniu powinien zapewniać korzystny rozkład temperatur oraz prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi. Konieczne jest zapewnienie dobrego wymieszania się powietrza nawiewanego i powietrza pomieszczenia przed dotarciem do strefy przebywania ludzi.

W pomieszczeniach handlowych i usługowych do kształtowania przepływu powietrza stosuje się generalnie organizację wymiany powietrza typu góra-góra. Wybrane schematy rozwiązań takiego typu organizacji wymiany powietrza w takich pomieszczeniach przedstawiono na rysunku 3.8. Rozmieszczenie elementów nawiewnych i wywiewnych w

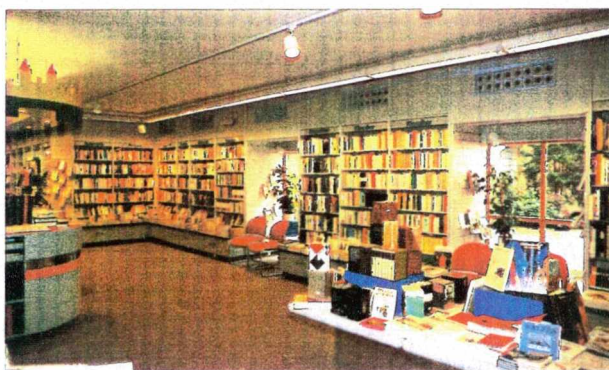
części podstropowej nie ogranicza zmian wystroju oraz funkcji pomieszczenia, co wymagane jest z potrzeb marketingowych. Wentylacja bądź klimatyzacja nie może ograniczać możliwości tego typu zmian.

Jednocześnie taki rodzaj organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu zapewnia prawidłowość kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach. Projektant ma pewność, iż elementy nawiewne oraz wywiewne, nie zostaną przesłonięte regałami, elementami wyposażenia lub wystroju wnętrza.

Na rysunku 3.8.a przedstawiono układ jednostronny, stosowany gdy stosunek szerokości do wysokości pomieszczenia jest nie większy niż 2(3). Jeżeli pomieszczenie jest stosunkowo niskie i szerokie, wówczas stosuje się układy dwustronne, rys.3.8.b.



Rys.3.8. Schematy organizacji wymiany powietrza typu góra-góra stosowane w obiektach handlowych i usługowych



Rys 3.9. Schemat organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu typu góra-góra, układ jednostronny. Nawiew powietrza za pomocą dysz nawiewnych

Zarówno w układach jedno jak i dwustronnych stosuje się kratki, szczeliny lub dysze nawiewne. Wywiew następuje najczęściej kratkami wywiewnymi. Gdy nawiewniki wywiewniki umieszczone są w górnej strefie pomieszczenia wówczas prawidłowe przewietrzanie pomieszczeń w zimie może być utrudnione (temperatura powietrza nawiewanego jest wyższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu).

Omawiany rodzaj organizacji wymiany powietrza stosowany jest w pomieszczeniach handlowych i usługowych o stosunkowo niewielkich kubaturach i wysokościach. Często są to pomieszczenia oferujące usługi i towary o wysokim standardzie. Podobne systemy stosowane są w księgarniach i bibliotekach, w których kłopotliwym elementem wyposażenia są wysokie regały.

Na rys.3.8.c przedstawiono schemat organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu typu góra-góra z zastosowaniem anemostatów lub krutek nawiewnych. Kanały rozprowadzające powietrze oraz skrzynki rozprężne zainstalowane są w przestrzeni międzystropowej.



Rys.3.10.. Julius Meinl w Budapeszcie

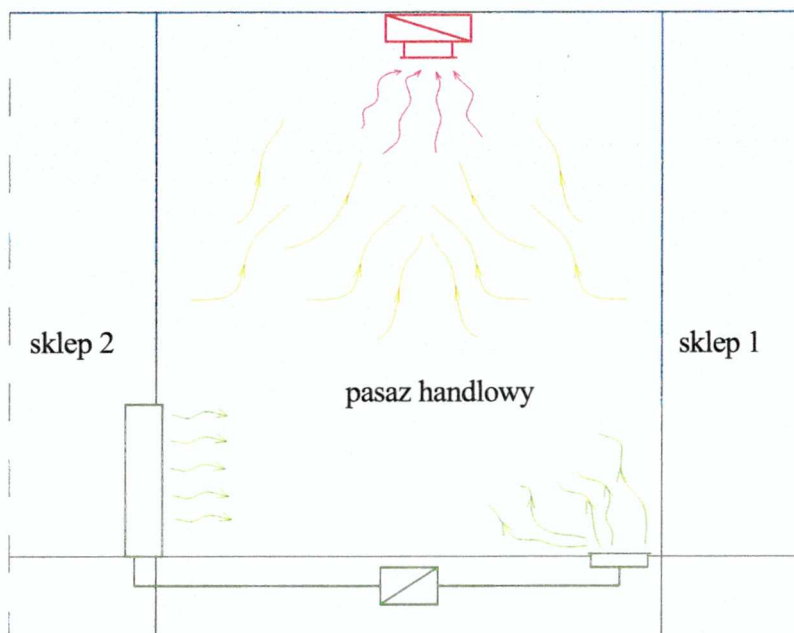
Taki system daje dobre efekty zarówno przy ochładzaniu jak i ogrzewaniu pomieszczenia. Kratki wywiewne mogą być podłączone bezpośrednio do kanałów wywiewnych lub mogą być elementami kontaktowymi pomiędzy pomieszczeniem a przestrzenią międzystropową. Wówczas powietrze wywiewane usuwane jest z przestrzeni międzystropowej. Podany sposób instalowania elementów nawiewnych i wywiewnych jest często stosowany w obiektach handlowych i usługowych. Jednak należy się tu liczyć z osiadaniem kurzu na stropie podwieszanym.

W dużych obiektach handlowych, w super i hipermarketach stosowane są głównie anemostaty nawiewne lub inne nietypowe elementy nawiewne. W halach sprzedaży nie stosuje się stropów podwieszanych. Kanały rozprowadzające powietrze wiszą jako nieosłonięte. Prowadzone dużo powyżej regałów „gubią się”. Klient nie zwraca uwagi na to, co znajduje się pod stropem, wysoko ponad regałami z towarem. W ten sposób niższe są koszty inwestycyjne.

W dużych, wysokich obiektach handlowych spotyka się układy, w których elementy wywiewne znajdują się powyżej nawiewnych (rys.3.8d). Taki układ jest korzystny w pomieszczeniach charakteryzujących się dużymi zyskami ciepła występującymi przez cały rok. Chłodne powietrze z dość dużą prędkością wylotową kierowane jest do strefy przebywania ludzi, gdzie ulega podgrzaniu. Podgrzane w strefie przebywania ludzi powietrze konwekcyjnie unosi się do góry i kieruje się do elementów wywiewnych.

Czasami, szczególnie w pasażach handlowych, stosowana jest organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniu typu dół - góra, jak na rys. 3.11. Elementy nawiewne

(nawiewniki źródłowe, wyporowe) umieszczane w ścianach, przy elementach konstrukcyjnych lub w podłodze wzdłuż ścian bocznych.



Rys. 3.11. Schemat organizacji wymiany powietrza typu dół - góra stosowany w pasażach handlowych.

Rzadziej stosuje się także, ale rzadziej nawiew powietrza przez powierzchnie perforowane umieszczone np. przy słupach. Należy jednak zauważyć, że nawiew źródłowy może ograniczyć zmiany wystroju bądź funkcji pomieszczenia.

Organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniu musi zapewnić w strefie przebywania ludzi wymagane parametry powietrza. Natomiast rozproszanie instalacji powietrznych oraz elementy zakańczające powinny być wkomponowane w architekturę i wystrój pomieszczeń.

4. URZĄDZENIA KLIMATYZACYJNE I WENTYLACYJNE

Zadaniem urządzeń klimatyzacyjnych bądź wentylacyjnych w omawianych obiektach jest zapewnienie w strefie przebywania ludzi parametrów powietrza odpowiadających komfortowi cieplnemu.

By temu sprostać należy:

- nawiewać wymagany strumień powietrza o odpowiednich parametrach,
- stosować nawiewniki zapewniające co najwyżej dopuszczalne prędkości i temperatury powietrza w strefie przebywania ludzi,
- zapewnić dużą elastyczność, czyli możliwość zmian parametrów oraz ewentualnie strumieni powietrza dostosowując je do chwilowych obciążeń cieplnych pomieszczeń.

W rozbudowanych układach powietrznych obsługujących szereg pomieszczeń należy dodatkowo przewidzieć możliwość indywidualnego kształtowania parametrów powietrza nawiewanego do poszczególnych pomieszczeń.

Przy wyborze systemu wentylacji bądź klimatyzacji należy zatem wziąć pod uwagę:

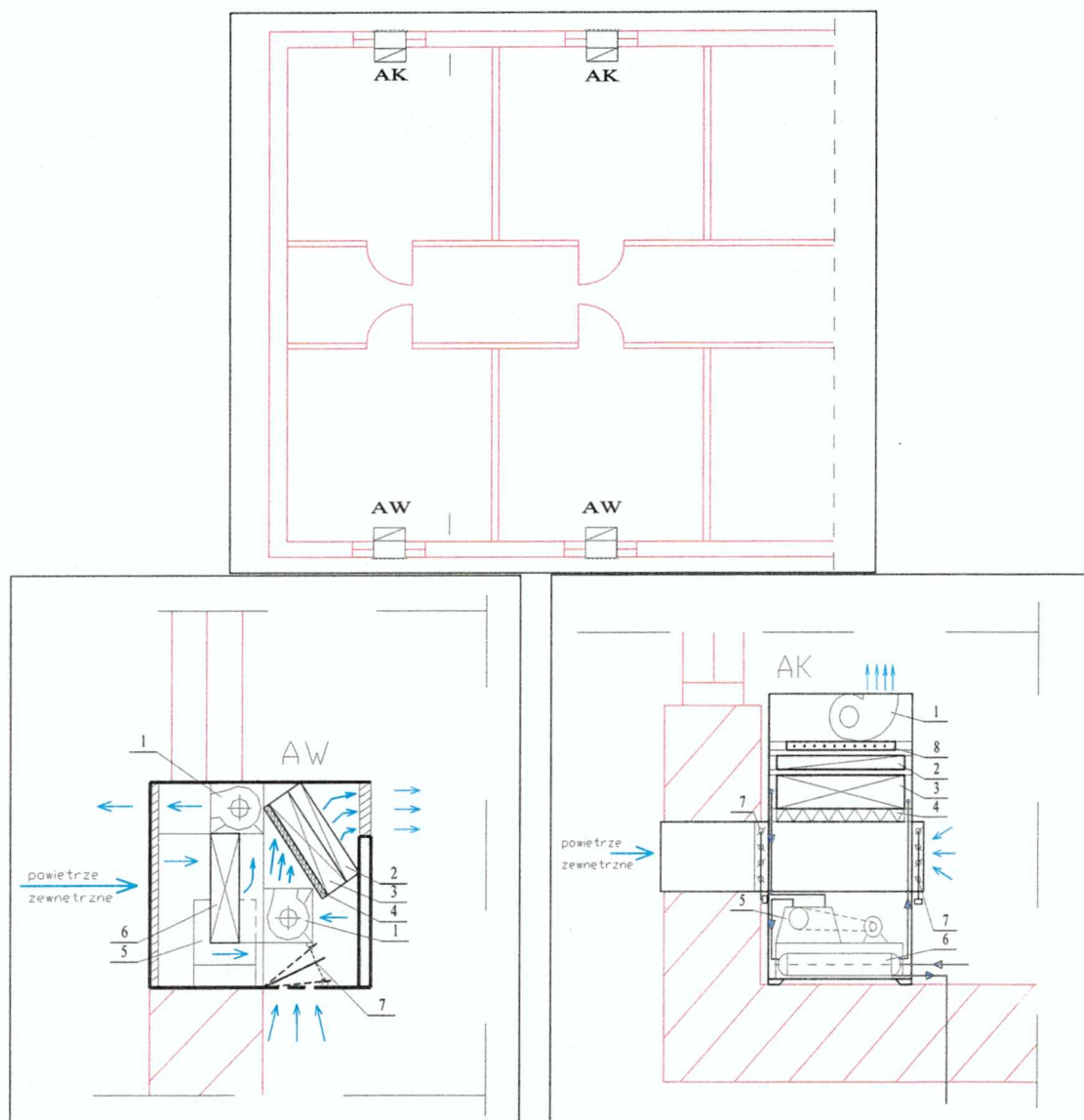
- wielkość i strukturę wewnętrzną budynku oraz funkcje poszczególnych pomieszczeń,
- charakterystykę cieplną budynku i dynamikę zmian zysków ciepła w poszczególnych pomieszczeniach,
- maksymalne i minimalne obciążenia cieplne poszczególnych pomieszczeń zarówno w warunkach obliczeniowych jak i w cyklu całorocznym,
- relacje między nakładami inwestycyjnymi a kosztami eksploatacyjnymi.

Dla celów kształtowania mikroklimatu pomieszczeń handlowych i usługowych stosuje się różne rodzaje urządzeń wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, których przykładowe rozwiązania omówiono poniżej.

4.1 Indywidualne urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne

Urządzenia te obsługiwać mogą jedno lub kilka pomieszczeń. Montowane są bezpośrednio w pomieszczeniach obsługiwanych lub w niewielkiej odległości od nich. Są to aparaty klimatyzacyjne bądź wentylacyjnych. Często mają one wbudowane agregaty żiębnicze. Uzdadniać mogą powietrze zewnętrzne, mieszaninę powietrza zewnętrznego i

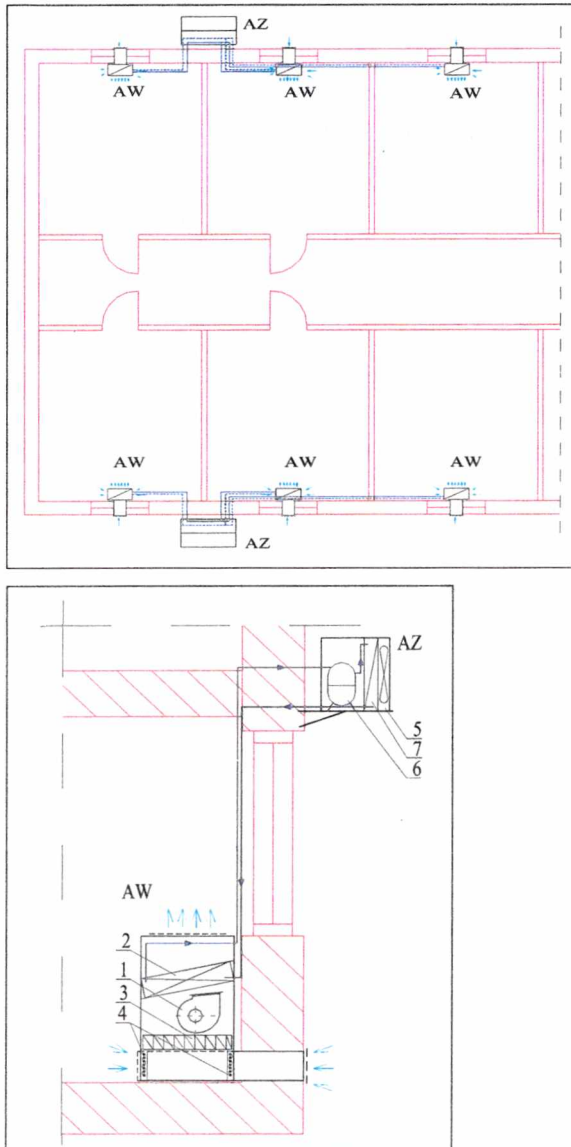
powrotnego lub tylko powietrze obiegowe. Na rysunkach 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4 przedstawiono schematy układów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych uzdatniających powietrze w aparatach indywidualnych.



Rysunek 4.1. Klimatyzacja i wentylacja pomieszczeń handlowo – usługowych z zastosowaniem indywidualnych aparatów wentylacyjnych AW i klimatyzacyjnych AK zainstalowanych w pomieszczeniach. Oznaczenia: 1 – wentylatory, 2 – nagrzewnice, 3 – chłodnice (parowacze), 4 – filtry powietrza, 5 – sprężarki, 6 – skraplacze, 7 – przepustnice, 8 – nawilżacz parowy.

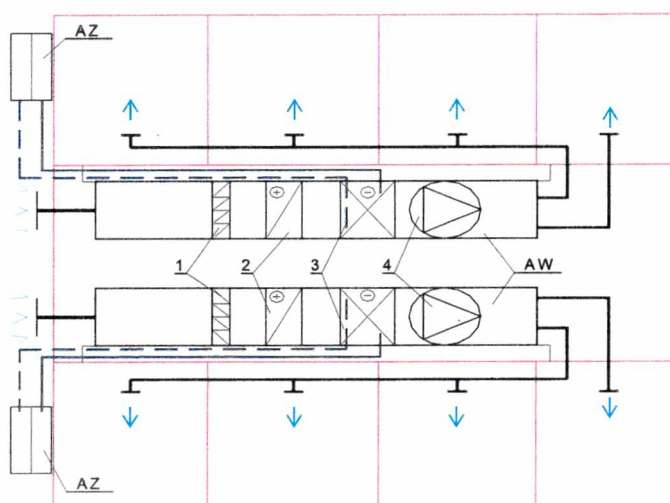
Na rysunku 4.1 przedstawiono wentylację i klimatyzację pomieszczeń z zastosowaniem indywidualnych aparatów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w pomieszczeniach. Aparaty są fabrycznie wyposażone w agregaty chłodnicze i układy

automatycznej regulacji i sterowania. Przepustnice (7), umożliwiają pracę na powietrzu obiegowym bądź na zewnętrznym lub na mieszaninie powietrza zewnętrznego i obiegowego. Czynnikiem zasilającym nagrzewnice (2) może być woda grzewcza, energia elektryczna bądź freon (przy zastosowaniu układu chłodzenia z pompą ciepła). Skraplacze (6) chłodzone są indywidualnie powietrzem zewnętrznym bądź wodą z instalacji centralnej. Zastosowanie (wbudowanych w aparaty wentylacyjne bądź klimatyzacyjne) układów chłodzenia z pompami ciepła pozwala na ograniczenie kosztów eksploatacyjnych. Na powietrzu uzdatnianym można zastosować jeden wymiennik, który przy pracy w funkcji chłodzenia jest parowaczem, a przy pracy w funkcji podgrzewania skraplaczem. Na rysunku 4.2 przedstawiono schemat układu wentylacyjnego (klimatyzacyjnego) pomieszczeń handlowo – usługowych z zastosowaniem indywidualnych aparatów w pomieszczeniach. Kilka aparatów wewnętrznych AW zasilanych jest z jednego aparatu zewnętrznego AZ, który może być prostym agregatem żiębniczym lub agregatem rozbudowanym z dodatkową funkcją pompy ciepła. Przy uzdatnianiu powietrza w aparatach wentylacyjnych bądź klimatyzacyjnych strumienie powietrza zewnętrznego i obiegowego są zwykle stałe, ustawiane ręcznie. Niekiedy, w zależności od pory roku, ręcznie zmienia się udziały powietrza zewnętrznego i obiegowego.



Rysunek 4.2. Wentylacja pomieszczeń handlowo – usługowych z zastosowaniem indywidualnych aparatów wentylacyjnych AW w pomieszczeniach i zasilanych czynnikiem chłodniczym (grzewczym) z agregatu zewnętrznego AZ. Oznaczenia: 1 – wentylator, 2 – wymiennik ciepła (chłodnica – parowacz, nagrzewnica – skraplacz), 3 – filtr powietrza, 4 – przepustnice powietrza zewnętrznego i obiegowego, 5 – wentylator osiowy, 6 – sprężarka, 7 – wymiennik ciepła (skraplacz – agregat chłodniczy, parowacz – pompa ciepła)

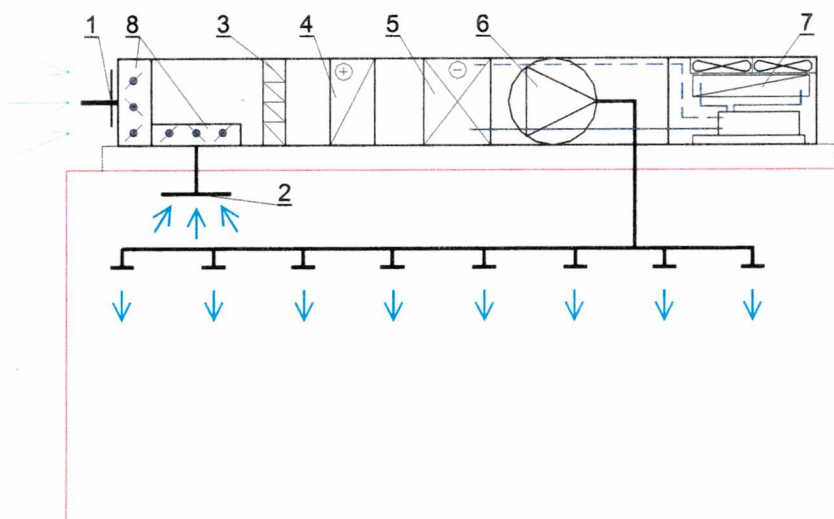
Na rysunku 4.3 przedstawiono schemat układu wentylacyjnego (klimatyzacyjnego) realizowanego z kanałowym aparatem wentylacyjnym (klimatyzacyjnym) z kanałowym rozprowadzeniem powietrza.



Rysunek 4.3. Schemat układu wentylacyjnego (klimatyzacyjnego) z uzdatnianiem powietrza w kanałowym aparacie wentylacyjnym z wbudowanym układem zasilanym z agregatu zewnętrznego. Oznaczenia: 1 – filtr, 2 – nagrzewnica, 3 – chłodnica (parowacz), 4 – wentylator, AW – aparat wentylacyjny kanałowy, AZ – agregat zewnętrzny

Każdy aparat wewnętrzny obsługuje kilka pomieszczeń, do których powietrze doprowadzane jest kanałami. Przedstawiono aparaty uzdatniające powietrze zewnętrzne, które jest oczyszczane oraz może być podgrzewane lub ochładzane. Przy zastosowaniu agregatu zewnętrznego z wbudowaną pompą ciepła podgrzewanie i chłodzenie powietrza realizowane jest w jednym wymienniku, który może być zarówno skraplaczem jak i parowaczem. Zmiana funkcji aparatu zewnętrznego AZ z agregatu chłodniczego na pompę ciepła jest automatyczna i wynika z chwilowego uzdatniania powietrza. Każdy aparat zewnętrzny może zasilać jeden lub kilka aparatów wewnętrznych. Przy zasilaniu kilku aparatów wewnętrznych przez jeden aparat zewnętrzny z pompą ciepła wszystkie aparaty wewnętrzne muszą pracować w podobnej funkcji uzdatniania powietrza. Przy wentylacji bądź klimatyzacji zgodnie z rozwiązaniem przedstawionym na rysunku 4.3 wszystkie pomieszczenia obsługiwane z jednego aparatu wewnętrznego muszą mieć podobną charakterystykę i dynamikę zmian obciążeń cieplnych.

Na rysunku 4.4 przedstawiono schemat układu wentylacyjnego (klimatyzacyjnego) dużej hali sprzedaży. Powietrze uzdatniane jest w monoblokowym urządzeniu typu rooftop, w którym wbudowane jest urządzenie chłodnicze ze skraplaczem chłodzonym powietrzem.



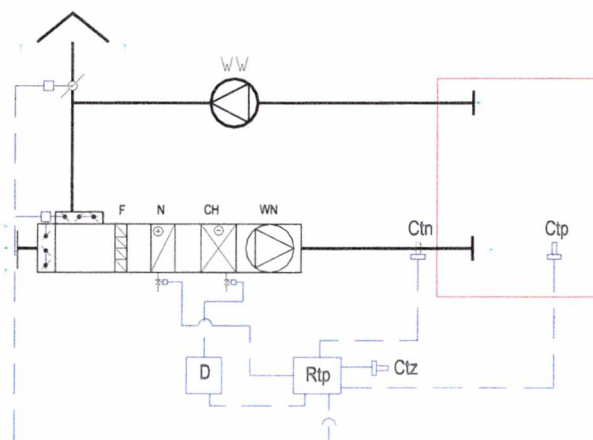
Rysunek 4.4. Schemat układu wentylacyjnego hali sprzedaży z wykorzystaniem monoblokowego urządzenia typu roof-top. Oznaczenia: 1 – czerpnia powietrza zewnętrznego, 2 – czerpnia powietrza obiegowego, 3 – filtr powietrza, 4 – nagrzewnica, 5 – chłodnica, 6 – wentylator, 7 – urządzenie chłodnicze, 8 – przepustnice.

Udział powietrza zewnętrznego i obiegowego może być stały bądź zmienny, sterowany ręcznie lub automatycznie. Nadwyżka powietrza nawiewanego usuwana może być przez kłapy nadmiarowe lub przez dodatkowe wentylatory wywiewne. Na rysunku 4.4 przedstawiono najprostsze rozwiązanie układu wentylacji z wykorzystaniem monoblokowych urządzeń typu roof-top, często stosowane w dużych jednokondygnacyjnych pawilonach handlowych.

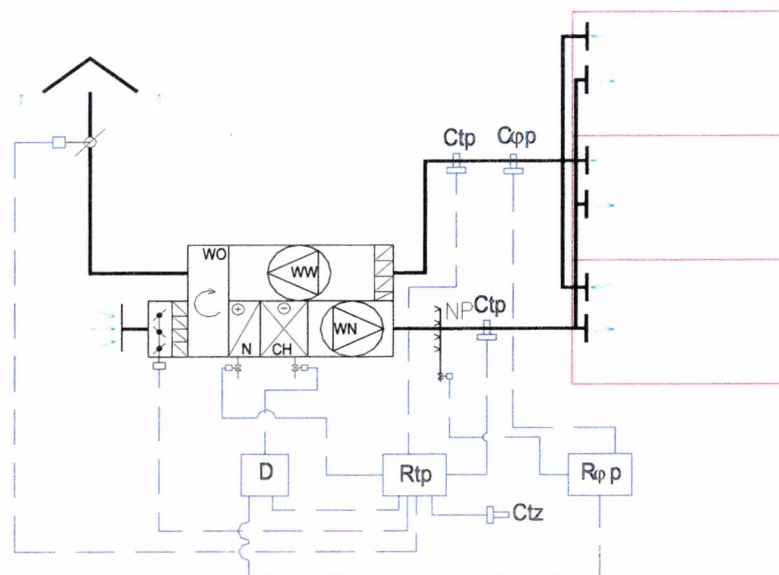
4.2. Centralne urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne

Na rysunkach 4.5 i 4.6 przedstawiono schematy układów wentylacyjnego i klimatyzacyjnego z centralnym uzdatnianiem powietrza. Urządzenia takie stosuje się do kształtowania mikroklimatu w jednym, bądź w niewielkiej liczbie pomieszczeń o bardzo zbliżonych charakterystykach cieplnych. Mogą uzdatniać zarówno powietrze zewnętrzne jak i mieszaninę powietrza zewnętrznego z obiegowym o zmiennym udziale powietrza zewnętrznego. Przy pracy omawianych urządzeń tylko na powietrzu zewnętrznym (w układzie otwartym) stosowany jest odzysk energii z powietrza wywiewanego. Przy wentylacji bądź klimatyzacji kilku pomieszczeń jednym urządzeniem parametry powietrza

nawiewanego do wszystkich pomieszczeń są podobne. Parametry powietrza w poszczególnych pomieszczeniach są efektem chwilowych zysków ciepłych i wartości strumieni powietrza nawiewanego. Zatem mogą się różnić, niekiedy znacznie. Sterowanie procesami uzdatniania powietrza odbywa się najczęściej w oparciu o średnie parametry powietrza wywiewanego z wszystkich pomieszczeń obsługiwanych. Regulacja jest regulacją jakościową. Regulowane są parametry powietrza nawiewanego. W przypadku stosowania urządzeń ze zmiennymi strumieniami powietrza regulacja może być również ilościową. Przy obsłudze kilku pomieszczeń jednym urządzeniem o zmiennym strumieniu powietrza jego rozdział do poszczególnych pomieszczeń zachowuje stałą proporcję niezależnie od rzeczywistych potrzeb.

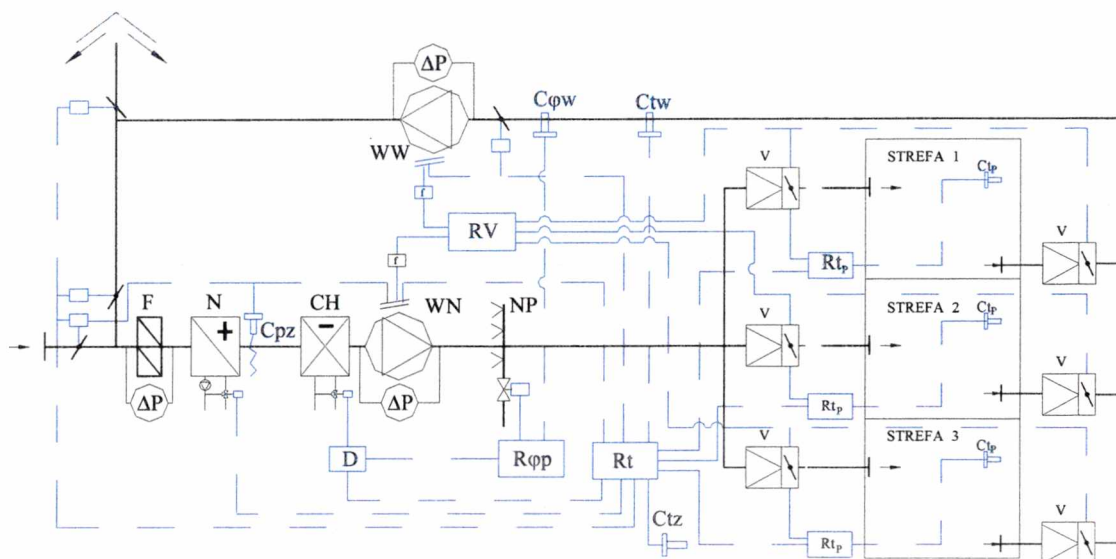


Rysunek 4.5. Schemat układu wentylacyjnego z centralnym uzdatnianiem powietrza i recyrkulacją powietrza wywiewanego.



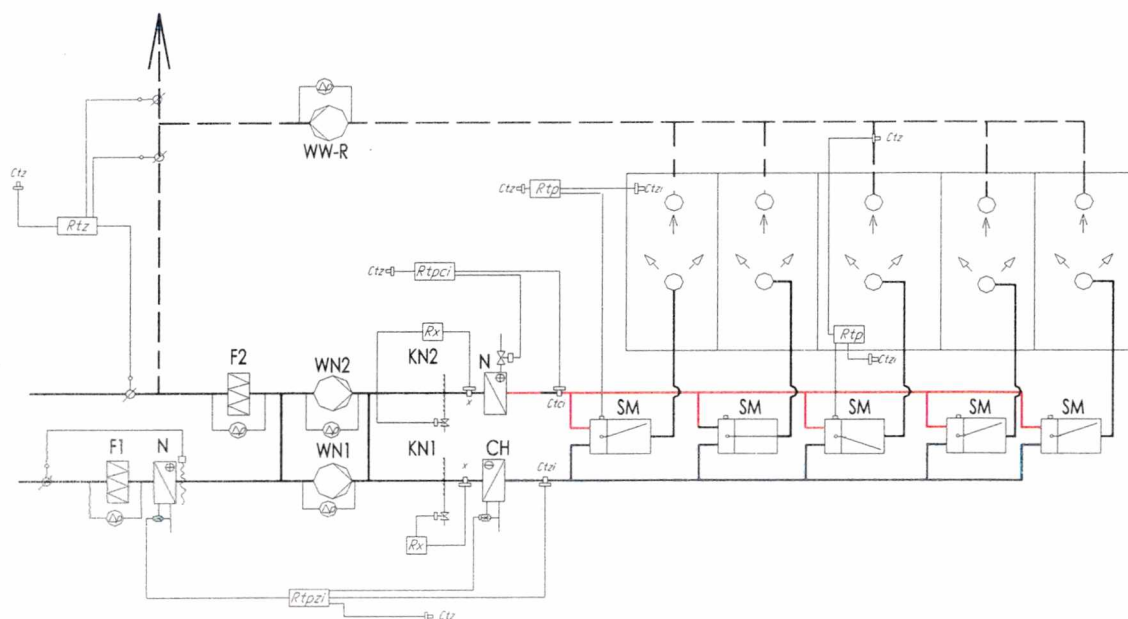
Rysunek 4.6. Schemat układu klimatyzacyjnego z centralnym uzdatnianiem powietrza i odzyskiem energii z powietrza wywiewanego

Na rysunku 4.7 przedstawiono schemat urządzenia ze zmiennym strumieniem powietrza klimatyzującego. Indywidualne regulatory przepływu (na nawiewie i wywiewie z poszczególnych pomieszczeń) pozwalają na korzystniejsze kształtowanie mikroklimatu w pomieszczeniach w porównaniu z urządzeniami z rys 4.5 i 4.6. Regulacja wartości strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego jest zarówno indywidualna, w odniesieniu do każdego pomieszczenia, jak i centralna- wentylatorów nawiewnego i wywiewnego. Regulacja wydajności wentylatorów następuje w funkcji sygnałów od indywidualnych regulatorów przepływu. Do wszystkich pomieszczeń nawiewane jest powietrze o podobnych parametrach, a regulacja w pomieszczeniach jest regulacją ilościową. Natomiast regulacja całego układu jest zarówno ilościowa jak i jakościowa.

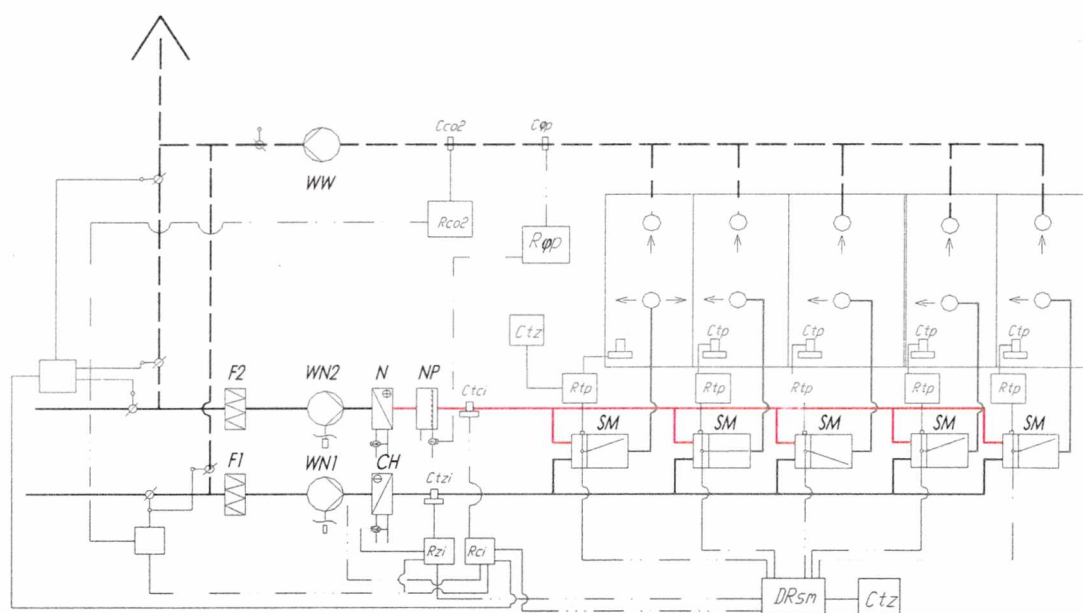


Rysunek 4.7. Schemat urządzenia klimatyzacyjnego z indywidualnymi regulatorami przepływu

Na rysunkach 4.8 i 4.9 przedstawiono urządzenia dwuprzewodowe z recyrkulacją powietrza. Urządzenia takie pozwalają na indywidualne kształtowanie parametrów powietrza nawiewanego do poszczególnych pomieszczeń lub do zespołu pomieszczeń przez mieszanie, strumieni powietrza zimnego i ciepłego przygotowanych centralnie. Sterowanie uzdatnianiem powietrza może być zarówno bezpośrednie (w oparciu o sygnały z regulatorów indywidualnych) jak i pośrednie (sygnałami temperatury zewnętrznej).



Rysunek 4.8. Schemat urządzenia dwuprzewodowego klimatyzacyjnego z recyrkulacją powietrza i pośrednią regulacją temperatury powietrza ciepłego i zimnego



Rysunek 4.9. Schemat urządzenia dwuprzewodowego z recyrkulacją powietrza i bezpośrednią regulacją temperatury powietrza ciepłego i zimnego

Urządzenia dwuprzewodowe są w Polsce mało popularne, jednak ich stosowanie może czasem okazać się optymalnym rozwiązaniem dla wentylacji bądź klimatyzacji obiektów wielopomieszczeniowych. Szereg firm klimatyzacyjnych i wentylacyjnych

produkuje elementy wyposażenia urządzeń dwuprzewodowych. Urządzenia te omówione zostały w literaturze [55,56], tam przedstawiono zasady ich stosowania oraz zalety i wady.

4.3. Urządzenia z dwustopniowym uzdatnianiem powietrza

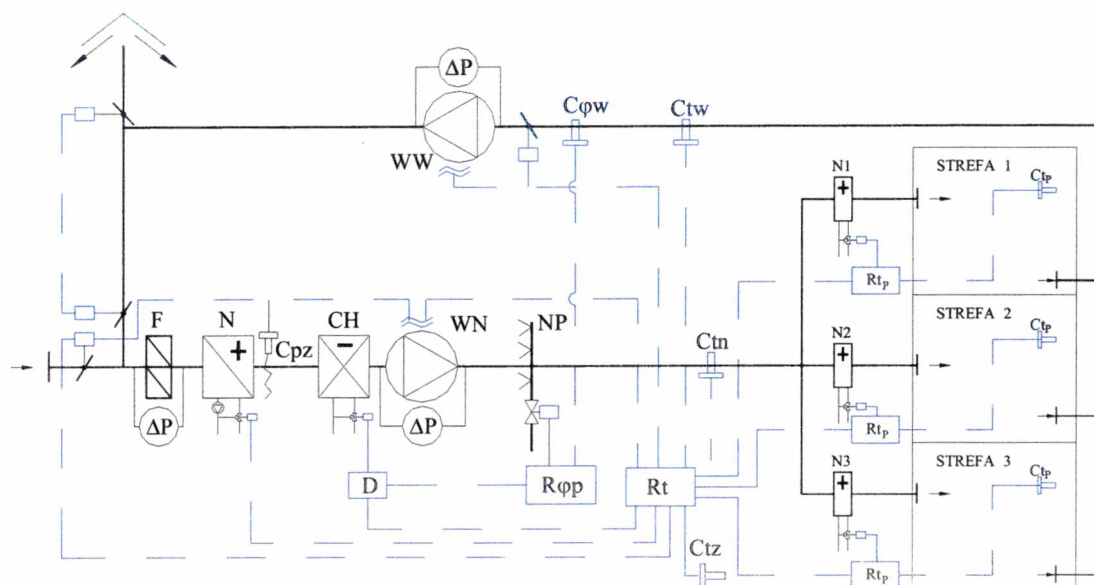
Urządzenia z dwustopniowym uzdatnianiem powietrza stosowane są do przygotowania powietrza wentylującego bądź klimatyzującego dla wielu (kilku, kilkudziesięciu a nawet kilkuset) pomieszczeń. W urządzeniach tych powietrze uzdatnione jest w dwóch etapach, najpierw centralnie potem indywidualnie. Centralnie przygotowywane powietrze doprowadzane jest do wszystkich pomieszczeń. Indywidualne uzdatnianie powietrza może nastąpić:

- przed nawiewem powietrza do pomieszczeń w instalacjach powietrznych bądź centralach strefowych,
- bezpośrednio w pomieszczeniach obsługiwanych.

Urządzenia te łączą w sobie zalety urządzeń centralnych i indywidualnych. Mogą być stosowane w różnych rozwiązaniach jako urządzenia:

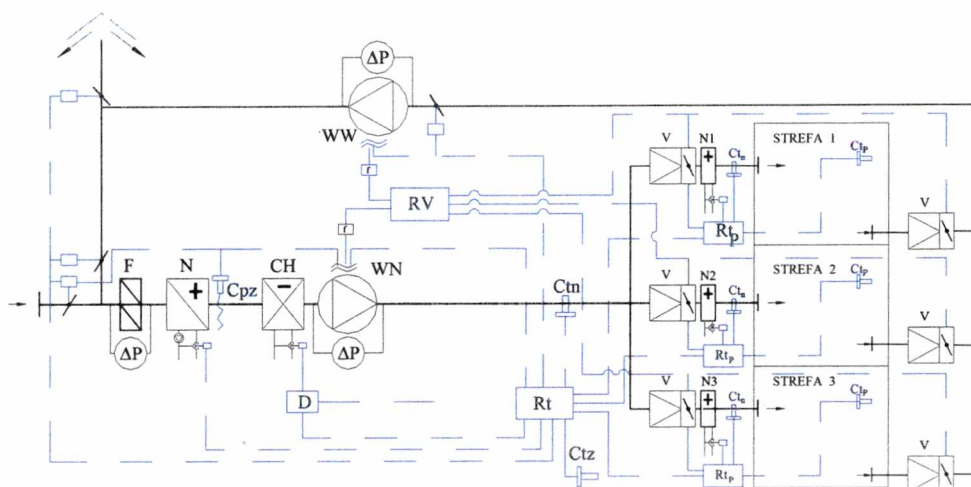
- niskociśnieniowe i wysokociśnieniowe,
- z otwartym przepływem powietrza,
- z odzyskiem energii z powietrza wywiewanego w wymiennikach,
- z recyrkulacją,
- ze stałym i zmiennym przepływem powietrza,
- z indywidualnym oczyszczaniem, podgrzewaniem i ochładzaniem, osuszaniem i nawilżaniem powietrza,
- ze stałymi i zmiennymi strumieniami powietrza zewnętrznego.

Na rysunkach 4.10÷4.13 przedstawiono różne rozwiązania urządzeń z dwustopniowym uzdatnianiem powietrza klimatyzującego bądź wentylującego.

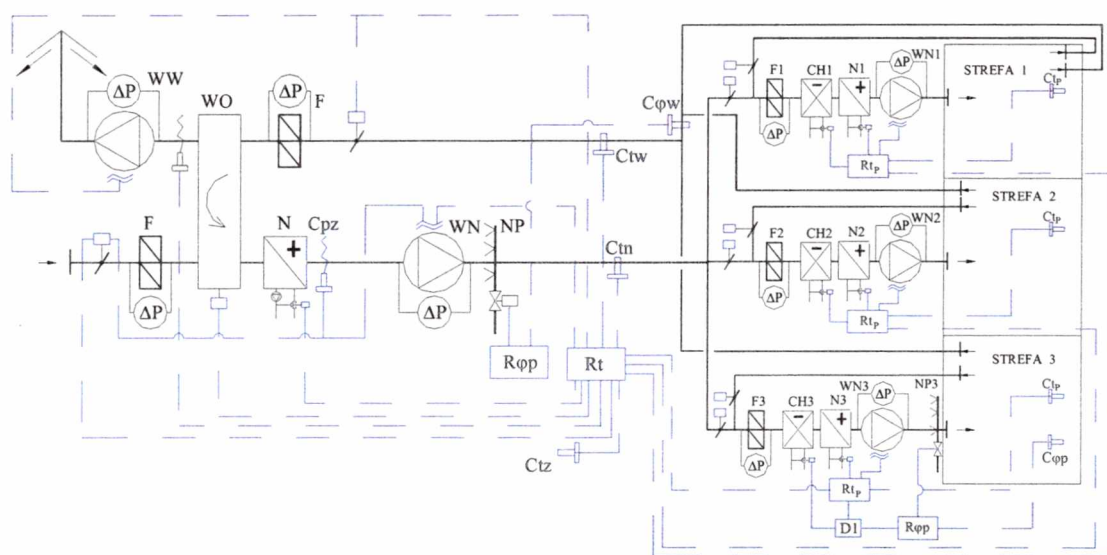


Rysunek 4.10. Schemat urządzenia z nagrzewnicami strefowymi i stałymi strumieniami powietrza

Na rysunku 4.10 przedstawiono schemat urządzenia klimatyzacyjnego z nagrzewnicami strefowymi i recyrkulacją powietrza wywiewanego. Takie rozwiązania pozwalają na indywidualne kształtowanie temperatury powietrza nawiewanego do poszczególnych stref. Sprzężenie strefowych regulatorów temperatury R_{tp} z regulatorem R_t , sterującym uzdatnianiem powietrza w centrali, pozwala na ograniczenie kosztów ochładzania powietrza w okresie letnim. Uzyskuje się to w wyniku bezpośredniego sterowania procesami ochładzania uzyskanymi sygnałami z regulatorów temperatury R_{tp} powietrza z pomieszczeń. Ideą tego sterowania jest obniżanie temperatury powietrza nawiewanego do wartości minimalnej wymaganej przez strefę o najwyższych chwilowych zyskach ciepła. Sygnał sterujący może pochodzić z różnych stref, ale zawsze ze strefy o najniższej temperaturze powietrza nawiewanego. Powietrze nawiewane do pozostałych stref (o wyższej temperaturze), podgrzewane jest w nagrzewnicach strefowych. W okresie zimowym powietrze w centrali podgrzewane jest do najniższej wymaganej temperatury powietrza nawiewanego, a więc do temperatury nawiewu do strefy o najwyższym obciążeniu cieplnym. Urządzenie klimatyzacyjne widoczne na rysunku 4.10 przewidziano do pracy ze stałymi strumieniami powietrza. Możliwa jest jednak centralnie sterowana zmiana strumieni powietrza uzdatnianego oraz proporcjonalna zmiana strumieni powietrza klimatyzującego poszczególne strefy.



Rysunek 4.11. Schemat urządzenia wentylacyjne ze zmiennymi strumieniami powietrza oraz strefowymi regulatorami przepływu powietrza i nagrzewnicami strefowym



Rysunek 4.12. Schemat urządzenia wentylacyjne z centralami strefowymi

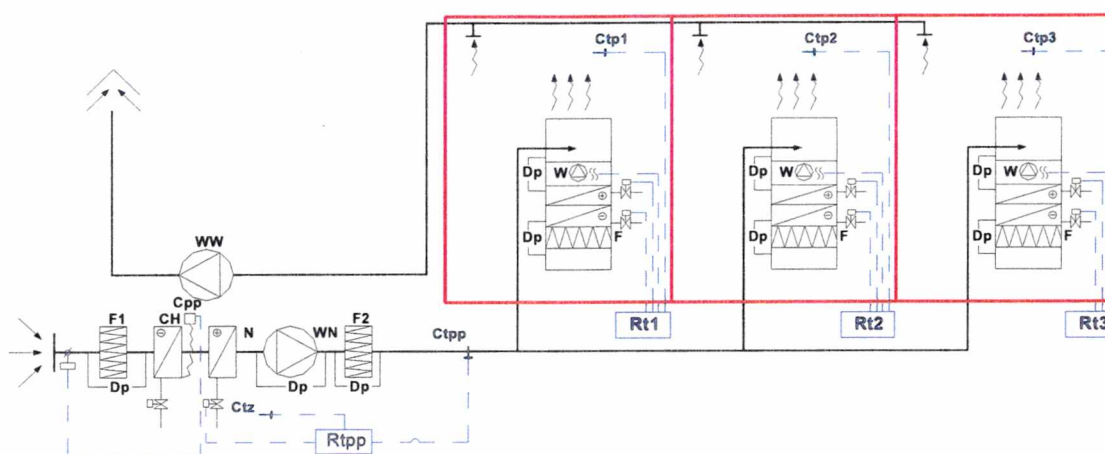
Na rysunku 4.11 przedstawiono schemat urządzenia wentylacyjnego z nagrzewnicami strefowymi i regulatorami przepływu powietrza. W urządzeniu tym uzyskuje się ograniczenie kosztów eksploatacyjnych transportu i uzdatniania powietrza. Indywidualna regulacja strumieni powietrza wentylujących poszczególne strefy oraz sprzężenie jej z regulacją parametrów pracy wentylatorów pozwala na optymalną, a jednocześnie dynamiczną regulację ich pracy. Ideą rozwiązania jest praca układu z otwartą

przepustnicą regulatora w strefie o największych oporach przepływu powietrza. Pozostałe regulatory, dla wyrównania oporów przepływu powietrza, mają przymknięte przepustnice regulacyjne. Sterowanie strumieniami powietrza w poszczególnych strefach przewidziano różnicami temperatur powietrza w pomieszczeniu i nawiewanego.

W urządzeniach przedstawionych na rysunkach 4.10 i 4.11 centralnie uzdatniany jest cały strumień powietrza klimatyzującego, bądź wentylującego. Natomiast w nagrzewnicach strefowych podgrzewane są tylko strumienie powietrza nawiewanego do poszczególnych stref. Urządzenia z nagrzewnicami strefowymi omówione zostały w literaturze [50, 51, 56,]. Na rysunku 4.12 przedstawiono schemat urządzenia wentylacyjnego z centralami strefowymi. Centralnie uzdatniane jest powietrze zewnętrzne, które o identycznych parametrach dopływa do poszczególnych central strefowych

Podstawowym zadaniem tego powietrza jest zapewnienie wymaganych warunków higienicznych czyli utrzymania „świeżości” powietrza w pomieszczeniach. Ponadto powietrze to może wspomagać centrale strefowe przy asymilacji zysków ciepła w okresach zimowym i przejściowym. Oznacza to ograniczenie podgrzewania uzdatnionego powietrza zewnętrznego w części centralnej i indywidualne podgrzewanie powietrza w centralach strefowych do temperatur wymaganych w poszczególnych strefach. W przedstawionym rozwiązaniu powietrze zewnętrzne może być podgrzewane w wymienniku do odzysku energii i nagrzewnicy. Natomiast w okresie letnim centralne ochładzanie powietrza może być realizowane tylko w niewielkim zakresie w wymienniku do odzysku energii. Generalnie proponuje się procesy ochładzania przeprowadzać indywidualnie w poszczególnych centralach strefowych do temperatur wymaganych w tych strefach. Powietrze wentylujące uzdatniane jest do parametrów nawiewu w centralach strefowych. Ich praca decyduje o dotrzymaniu wymaganych parametrów powietrza w pomieszczeniach poszczególnych stref. Parametry powietrza nawiewanego dla stref mogą różnić się znacznie między sobą. Centrale strefowe umieszczane są bezpośrednio w pomieszczeniach obsługiwanych lub w bliskiej odległości od nich w pomieszczeniach technicznych lub pomocniczych. Powietrze nawiewane, a często także wywiewane rozprowadzane jest kanałami do pomieszczeń obsługiwanych.

Pokazany schematycznie na rysunku 4.12 układ wentylacyjny z centralami strefowymi przewidziany jest do pracy ze stałymi strumieniami powietrza wentylującego i stałymi udziałami powietrza zewnętrznego w wentylującym. Urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne z centralami strefowymi omówiono w literaturze [55].



Rysunek 4.13. Schemat urządzenia wentylacyjnego z wentylokonwektorami

Na rysunku 4.13 przedstawiono schemat układu wentylacyjnego z centralnym przygotowaniem powietrza zewnętrznego i indywidualnym uzdatnianiem powietrza obiegowego. Podstawowym zadaniem powietrza zewnętrznego jest zapewnienie wymaganych warunków higienicznych. Centrale uzdatniające powietrze zewnętrzne pracują zwykle ze stałymi wydajnościami. Jednak coraz częściej stosowane są również układy pracujące ze zmiennymi strumieniami powietrza regulowanymi skokowo lub w sposób ciągły. Układy te, w okresach przerw w użytkowaniu pomieszczeń, mogą zapewniać minimalne przewietrzanie. Ponadto w układach tych można ograniczyć bądź odciąć przepływ powietrza zewnętrznego do pomieszczeń chwilowo nieużytkowanych. Powietrze obiegowe uzdatniane jest w aparatach (wentylokonwektorach, klimakonwektorach, indukcyjnych belkach chłodzących, stropach chłodzących) zainstalowanych bezpośrednio w pomieszczeniach obsługiwanych.

Do omawianych aparatów napływa powietrze obiegowe, a nawiew powietrza uzdatnionego do pomieszczenia, jest zwykle bezkanałowy. W przypadku wentylokonwektorów doprowadzenie powietrza z pomieszczenia, oraz nawiew do pomieszczenia (po jego uzdatnieniu) może być również kanałowy.

W pomieszczeniach wentylowanych bądź klimatyzowanych układami o dwustopniowym uzdatnianiu powietrza, których przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rysunku 4.13, strumienie indywidualnie uzdatnianego powietrza obiegowego są zwykle zdecydowanie

większe od doprowadzanych strumieni centralnie uzdatnianego powietrza zewnętrznego. Powyższe powoduje, że utrzymanie temperatury powietrza w poszczególnych pomieszczeniach na poziomach zadanych jest głównie zadaniem powietrza obiegowego. Ponadto indywidualne sterowanie uzdatnianiem powietrza obiegowego stwarza możliwości indywidualnego kształtowania mikroklimatu (temperatury) w poszczególnych pomieszczeniach zgodnie z wymaganiami poszczególnych użytkowników. Urządzenia z dwustopniowym uzdatnianiem powietrza i klimakonwektorami oraz wentylokonwektorami wieloaspektowo omówiono w literaturze [14, 50, 51, 55, 56].

Urządzenia o dwustopniowym uzdatnianiu powietrza mogą obsługiwać szereg pomieszczeń o zróżnicowanych wymaganiach oraz o różnej dynamice zmian obciążeń cieplnych dlatego znajdują coraz szersze zastosowanie w obiektach handlowych.

5. STANOWISKO POMIAROWE

5.1. Opis stanowiska

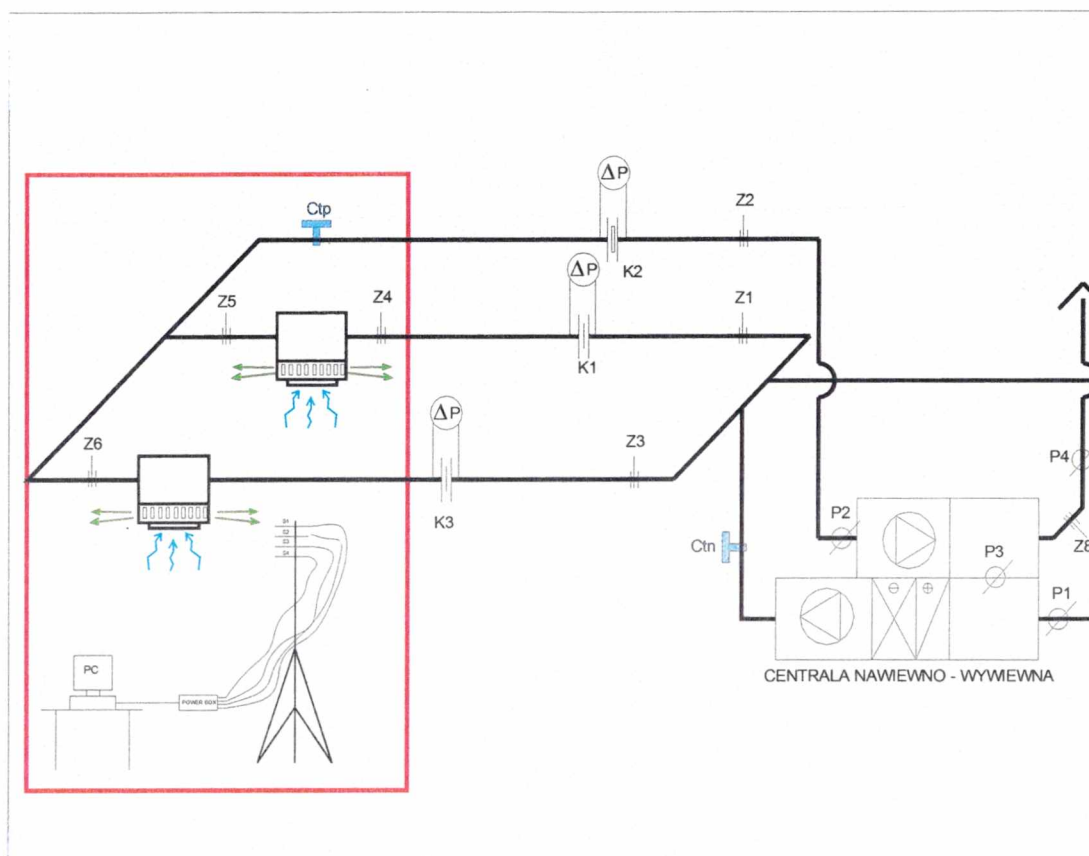
Badania przeprowadzone na stanowisku badawczym wykonywano celem określenia charakteru zmian prędkości w strugach nawiewnych pierścieniowych wpływających z otworów osłoniętych oraz celem wyznaczenia charakterystyk pracy zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych. Wszystkie badania przeprowadzono w warunkach izotermicznych.

Stanowisko pomiarowe (rys. 5.1), znajduje się w pomieszczeniu 401 budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

Powietrze zewnętrzne (lub mieszanina powietrza zewnętrznego i obiegowego) uzdatniane jest w centrali wentylacyjnej (firmy PWPO-T PROMONT ze Świebodzic.) W zależności od potrzeb, dla uzyskania strugi izotermicznej, powietrze zostaje podgrzane do wymaganej temperatury w nagrzewnicy elektrycznej lub zostaje wprost wprowadzone do kanału nawiewnego. Z uwagi na dużą zmienność pracy wentylatora nawiewnego ($V = 30 \div 3000 \text{ m}^3/\text{h}$) do układu został włączony również kanał „upustowy”, który umożliwia regulację strumienia powietrza nawiewanego w dowolnym zakresie. Do określenia strumienia powietrza wywiewanego i nawiewanego zastosowano kryzy pomiarowe z otworami przytarczowymi. Strumień powietrza nawiewanego regulowany jest odpowiednio zasuwami Z1 i Z3, oraz zasuwą na przewodzie upustowym Z7.

Czujniki temperatury powietrza nawiewnego (Ctn) oraz temperatury powietrza wywiewanego (Ctp) są elementami regulującymi których zadaniem jest zapewnienie temperatury powietrza zgodnej z zadaną przed rozpoczęciem każdej sesji pomiarowej.

Do pomiaru prędkości strugi nawiewnej oraz jej temperatury zastosowano 4 dokładne sondy do pomiaru prędkości i temperatury. Sondy te podłączone są do elementu przekazującego odczyty (POWER BOX) do komputera znajdującego się na stanowisku pomiarowym.



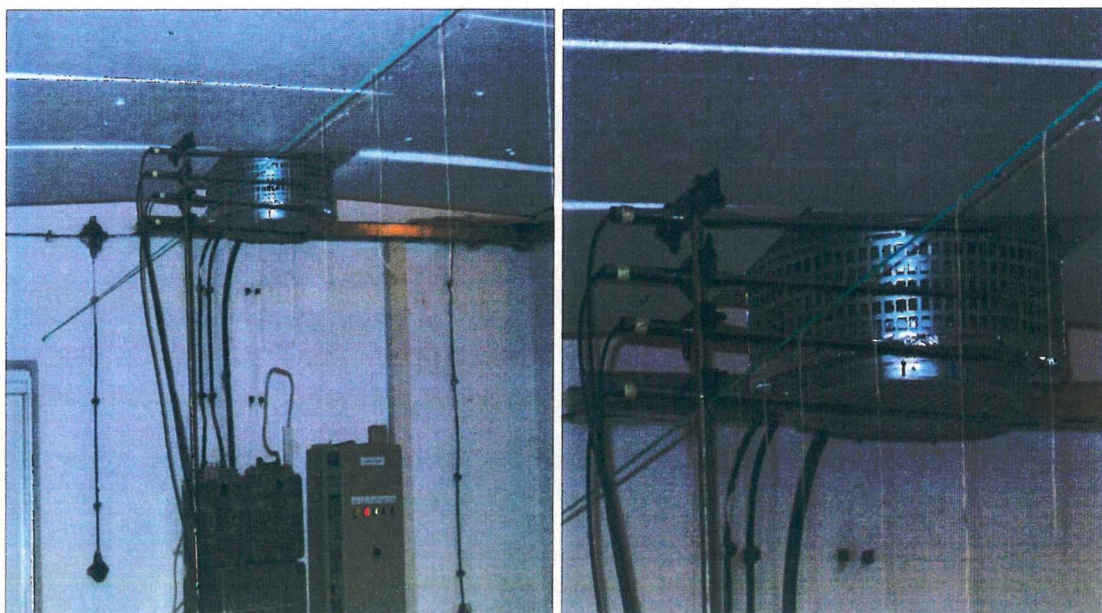
Rys.5.1. Schemat stanowiska pomiarowego. Oznaczenia:

$K1 \div K3$ kryzy pomiarowe, $Z1 \div Z8$ – zasuwki regulacyjne, $P1 \div P4$ – przepustnice regulacyjne,

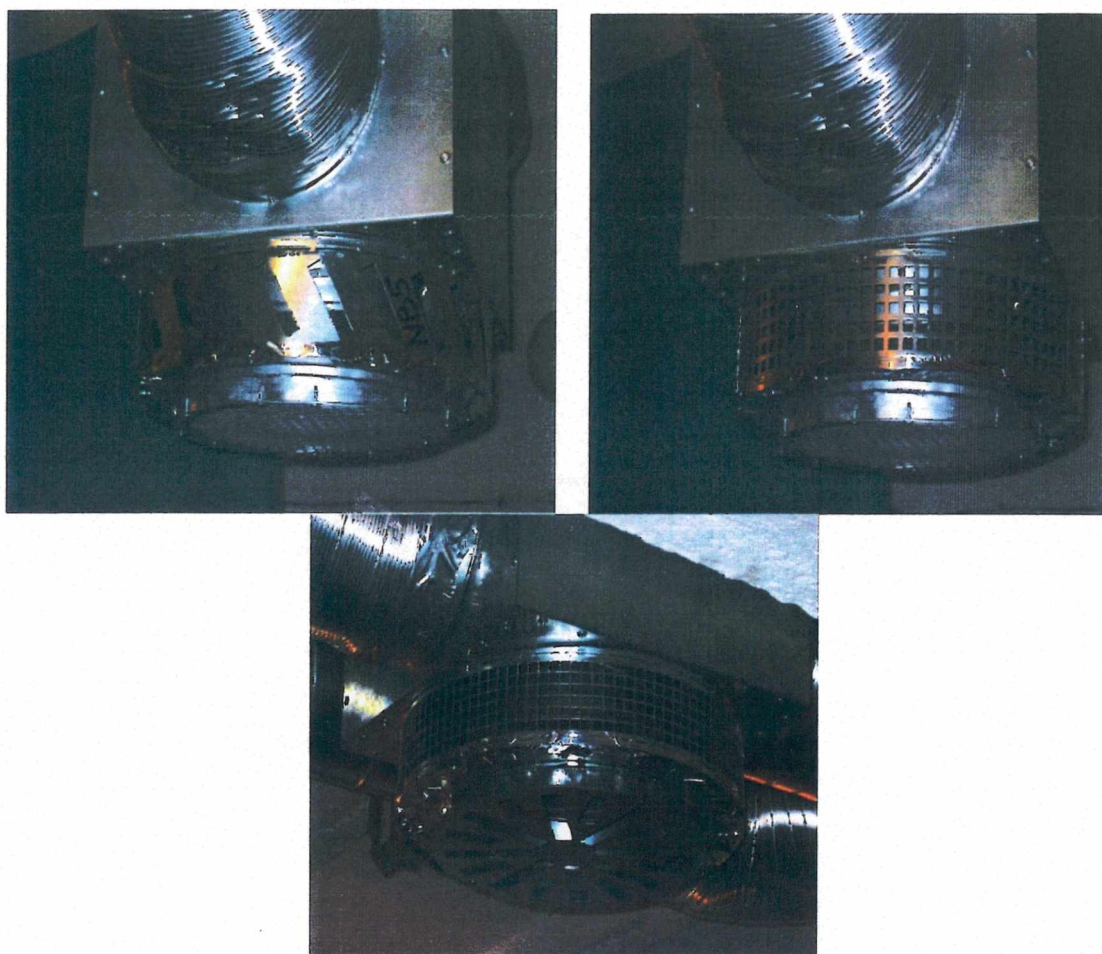
Ctn – czujnik temperatury powietrza nawiewanego, Ctp – czujnik temperatury powietrza w pomieszczeniu,

ΔP – pomiar różnicy ciśnień na kryzach pomiarowych,

Na rysunku 5.2. przedstawiono zdjęcia stanowiska pomiarowego natomiast na rys. 5.3 zdjęcia wybranych zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych.



Rys. 5.2. Zdjęcia stanowiska pomiarowego

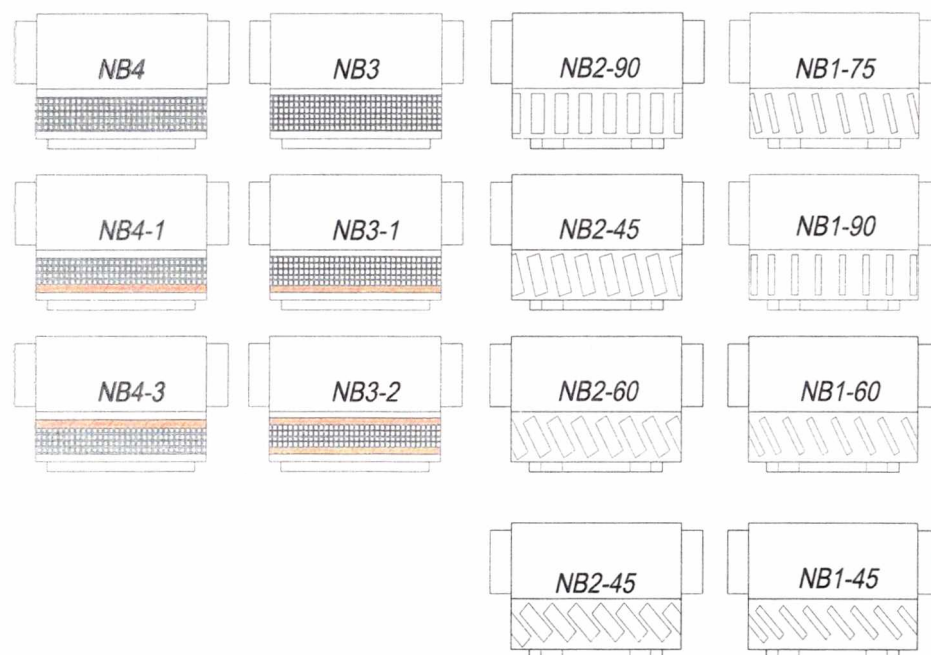


Rys. 5.3. Zdjęcia wybranych zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych

Na stanowisku badawczym dokonywano odczytów szeregu wielkości które, pozwalały na określenie następujących wielkości:

- strumienia powietrza nawiewanego,
- strumienia powietrza wywiewanego,
- prędkości powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych,
- temperatury w strumieniu powietrza nawiewanego w poszczególnych punktach pomiarowych.

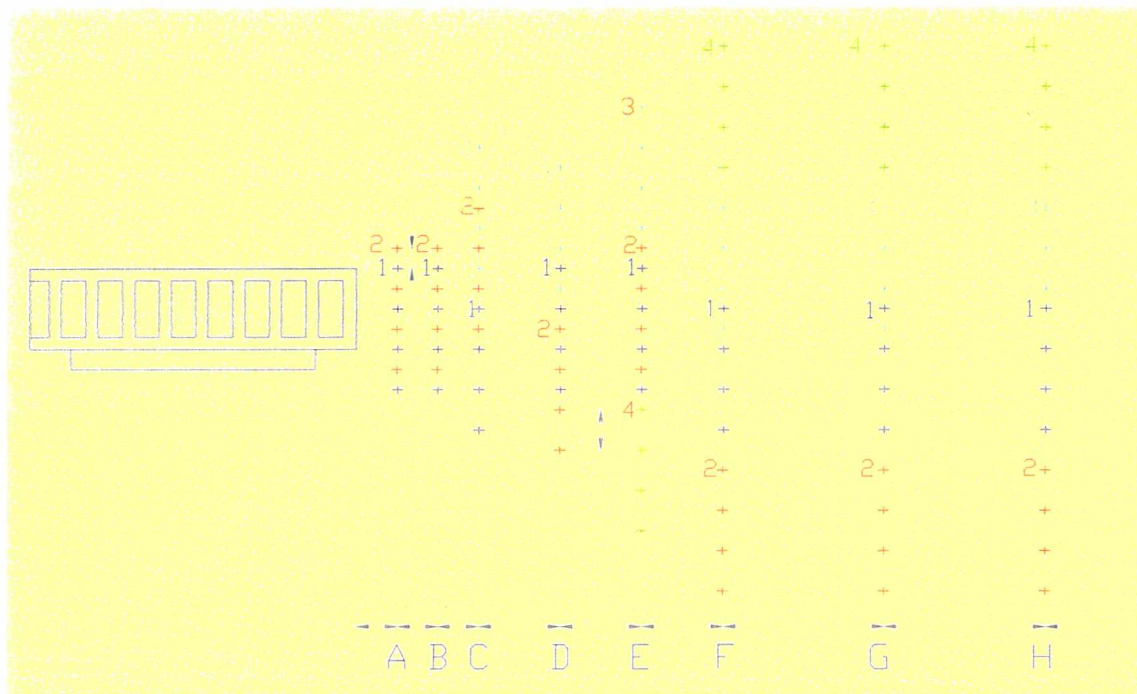
Przebadano 3 różnie modyfikowane pierścienie nawiewne: 1. ze szczelinami nawiewnymi wąskimi ($a=1,5$ cm), 2. ze szczelinami nawiewnymi szerokimi ($a=3$ cm) 3. perforowane. Modyfikacje polegały na zmianie kąta pochylenia szczelin, stopnia przesłonięcia oraz wysokości otworu nawiewnego. Poszczególne pierścienie badane na stanowisku przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys.5.4. Geometria i oznaczenie pierścieni nawiewnych

W poszczególnych odległościach oraz wysokościach od osi nawiewnika dokonywano pomiarów prędkości dla strumieni powietrza 250, 400 i 600 m³/h. Z uwagi na zmienny stopień perforacji pierścieni minimalna prędkości w otworze netto wynosiła 1,11 m/s, natomiast maksymalna 6,90 m/s.

Pomiary wykonywano w odległościach 50, 100, 150, 250, 350, 450, 650, ... 3000 mm od nawiewnika. W osi pionowej rozstaw punktów pomiarowych był co 25 lub 50 mm, mniejszy bliżej osi poziomej nawiewnika. Na rysunku 5.5 przedstawiono część schematu siatki wg której wykonywano pomiary.



Rys.5.5 Schemat siatki pomiarowej wg której przeprowadzano pomiary

Z uwagi na skąpą liczbę opracowań dotyczących nawiewów promieniowych natomiast bardzo dobre rozeznanie zagadnienia dotyczącego rozkładu prędkości w widmach zasysania badania poświęcono jedynie strugom nawiewnym-pierścieniowym.

5.2. Opis wielkości mierzonych

5.2.1. Pomiar strumienia powietrza nawiewanego

Strumień powietrza nawiewanego i wywiewanego przez zintegrowany element nawiewno-wywiewny mierzono za pomocą kryzy pomiarowej z przytarczowymi otworami impulsowymi. Wszystkie kryzy pomiarowe zostały wykonane zgodnie z normą

PN-ISO 5221:1994” Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie.”

Zewnętrzna średnica kryzy pomiarowej do pomiaru strumienia powietrza nawiewanego (K3) wynosi $D = 247$ mm, a średnica wewnętrzna $d = 125$ mm.

Zewnętrzna średnica kryzy pomiarowej do pomiaru strumienia powietrza wywiewanego (K2) wynosi $D = 247$ mm, a średnica wewnętrzna $d = 125$ mm.

Wszystkie kryzy pomiarowe zainstalowano w przewodach zgodnie z normą *PN-ISO 5221:1994*.

Strumień powietrza transportowanego kanałem nawiewnym i wywiewnym odpowiednio dla kryz K2 i K3 obliczano zgodnie z normą wg wzoru:

$$V = \frac{q_m}{\rho} \quad (5.1)$$

gdzie:

V – strumień powietrza nawiewanego lub wywiewnego, m^3/h ,

q_m – strumień masy powietrza nawiewanego lub wywiewnego, kg/s , obliczony z zależności:

$$q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta p} \quad (5.2)$$

w której:

α – liczba przepływu;

ε – liczba ekspansji;

d – wewnętrzna średnica kryzy, m;

ρ_1 – gęstość powietrza przed kryzą pomiarową (po stronie dopływu), kg/m^3 ;

Δp – ciśnienie różnicowe pomiędzy otworami impulsowymi przed i za urządzeniem, Pa.

Ciśnienie różnicowe mierzono przy użyciu sondy do pomiaru ciśnienia różnicowego typu TESTO 0638.1445 z precyzyjnym wielofunkcyjnym przyrządem pomiarowym typu TESTO 400. Dokładność pomiaru $\pm 0,01$ hPa.

5.1.2. Pomiar prędkości powietrza nawiewanego i wywiewnego w otworze netto oraz z poszczególnych punktach siatki pomiarowej

Prędkość powietrza w otworze netto pierścienia nawiewnego wykonywano za pomocą czterech dokładnych sond dwufunkcyjnych (typu TESTO 0635.1049) do pomiaru prędkości przepływu i temperatury powietrza z wysięgnikiem teleskopowym. Sondy te podłączono do loggera (POWER BOX) typu TESTO 454. Celem wyeliminowania

ewentualnych drgań, nierówności oraz zaburzeń przepływu sondy te umieszczone były na stojaku (rys.5.1, 5.2).

Sondy pomiarowe zamontowane na stanowisku służą do pomiaru prędkości przepływu w zakresie $0 \div 10$ m/s. Dokładność pomiaru $\pm 0,01$ m/s lub $\pm 5\%$ wartości mierzonej. Dokładność odczytu 0,01 m/s. Rejestrowane pomiary przez kartę sieciową PCMCIA przekazywane były do komputera i odczytywane za pomocą programu Comsoft 3 firmy TESTO. Następnie wszystkie pomiary obrabiano przy użyciu programu Microsoft Office – EXCEL 2002. W każdym punkcie pomiarowym dokonywano 10 w odstępach co 1 sekundę. Wynikiem pomiaru była średnia wartość prędkości dla pomiarów rejestrowanych w danym punkcie pomiarowym. Schemat siatki pomiarowej przedstawiono na rysunku 5.5.

5.1.3. Pomiar temperatury powietrza nawiewanego i wywiewnego

Pomiar temperatury powietrza nawiewanego wykonywano przy użyciu sond pomiarowych opisanych w punkcie 5.1.2. Temperaturę powietrza nawiewanego mierzono w otworze nawiewnym. Temperaturę powietrza wywiewnego mierzono w otworze netto płyty wywiewnej.

Sondy pomiarowe zamontowane na stanowisku służą do pomiaru temperatur powietrza w zakresie $-20 \div +70^{\circ}\text{C}$. Dokładność pomiaru $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Dokładność odczytu $0,1^{\circ}\text{C}$. Rejestrowane pomiary przez kartę sieciową PCMCIA przekazywane były do komputera i odczytywane za pomocą programu Comsoft 3 firmy TESTO. Następnie wszystkie pomiary obrabiano przy użyciu programu Microsoft Office – EXCEL 2002. W każdym punkcie pomiarowym dokonywano 10 w odstępach co 1 sekundę. Wynikiem pomiaru była średnia wartość prędkości dla pomiarów rejestrowanych w danym punkcie pomiarowym. Schemat siatki pomiarowej przedstawiono na rysunku 5.5.

5.1.4. Pomiar temperatury powietrza nawiewanego w poszczególnych punktach pomiarowych

Pomiar temperatury powietrza nawiewanego wykonywano przy użyciu sond pomiarowych opisanych w punkcie 5.1.3. Temperaturę powietrza mierzono w poszczególnych punktach siatki pomiarowej.

Rejestrowane pomiary przez kartę sieciową PCMCIA przekazywane były do komputera i odczytywane za pomocą programu Comsoft 3 firmy TESTO. Następnie wszystkie pomiary obrabiano przy użyciu programu Microsoft Office – EXCEL 2002. W każdym punkcie pomiarowym dokonywano 10 w odstępach co 1 sekundę. Wynikiem pomiaru była średnia wartość prędkości dla pomiarów rejestrowanych w danym punkcie pomiarowym. Schemat siatki pomiarowej przedstawiono na rysunku 5.5.

6. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

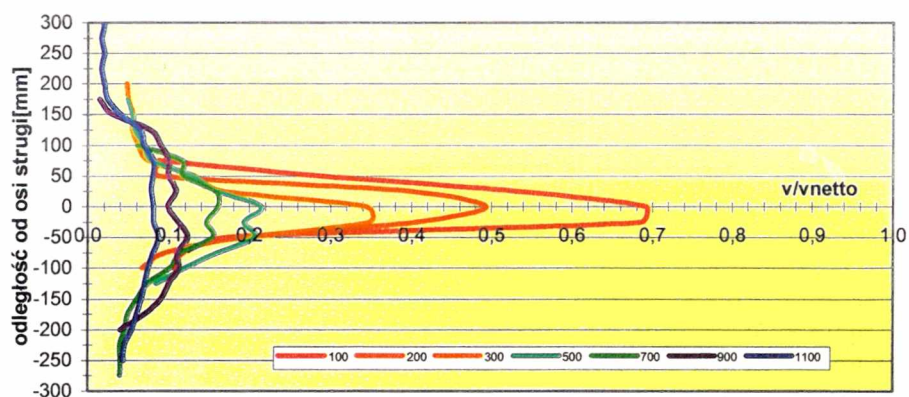
6.1. Uwagi ogólne

Wszystkie wyniki pomiarów opracowano z wykorzystaniem programu Microsoft Excel 2002. Siatka pomiarowa, przedstawiona w rozdziale 5 została tak przygotowana, aby możliwe było określenie prędkości bezwzględnych i względnych w poszczególnych odległościach od osi strugi oraz od płaszczyzny wypływu z nawiewnika. Wszystkie wyniki pomiarów jak i obliczeń dostępne są u autorki pracy.

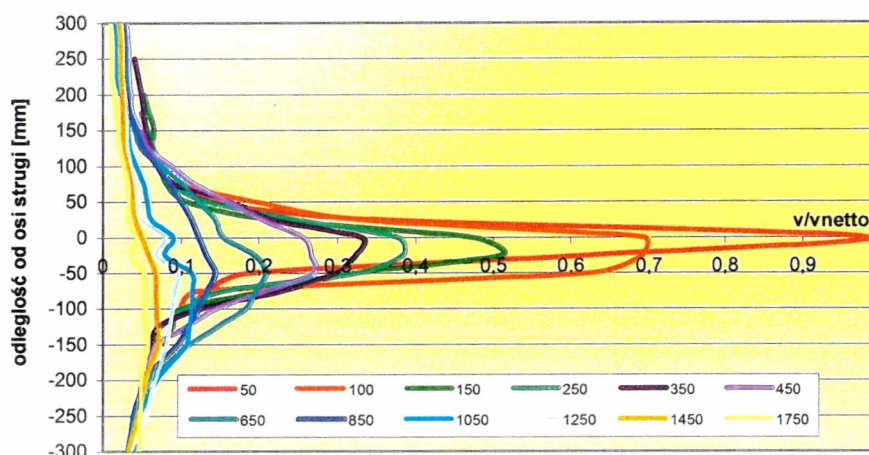
6.2. Rozkład prędkości względnych

Po serii pomiarów, celem wstępnej weryfikacji wyników pomiarów, opracowano wykresy rozkładu prędkości względnych ($v_w = \frac{v}{v_{netto}}$) w funkcji odległości od osi strugi i odległości od płaszczyzny wypływu. Na rysunku 6.1 przedstawiono wybrane wykresy dla 3 różnych pierścieni nawiewnych. Kolejne krzywe przedstawiają profil prędkości względnej powietrza w poszczególnych odległościach od nawiewnika.

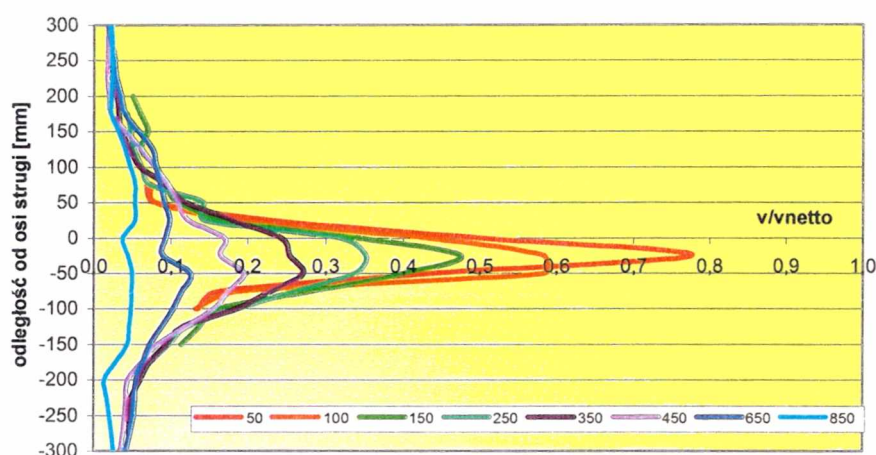
a)



b)



c)

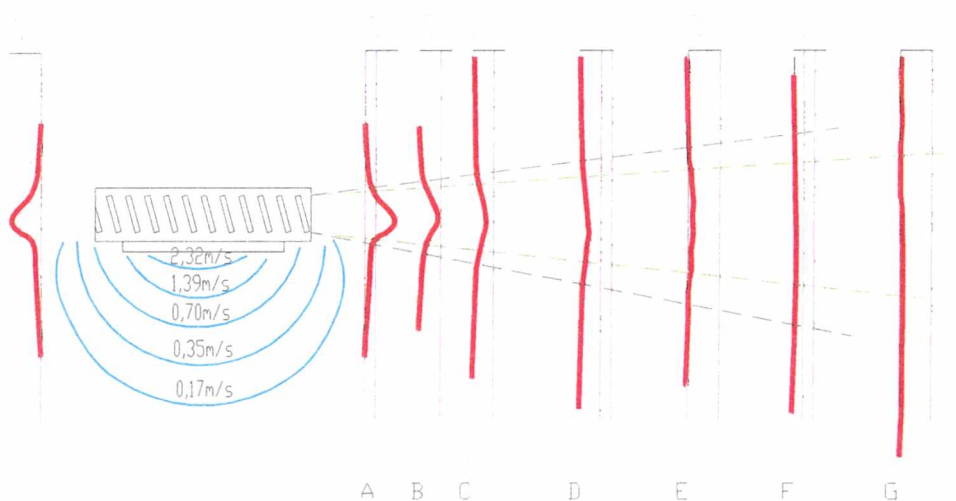


Rys.6.1. Kształt strugi wypływającej przez różne pierścienie nawiewne a) wąskie szczeliny NB1-0, $V = 250\text{m}^3/\text{h}$, b) szerokie szczeliny NB2-30, $V = 600\text{m}^3/\text{h}$, c) płyta perforowana NB3, $V = 600\text{m}^3/\text{h}$.

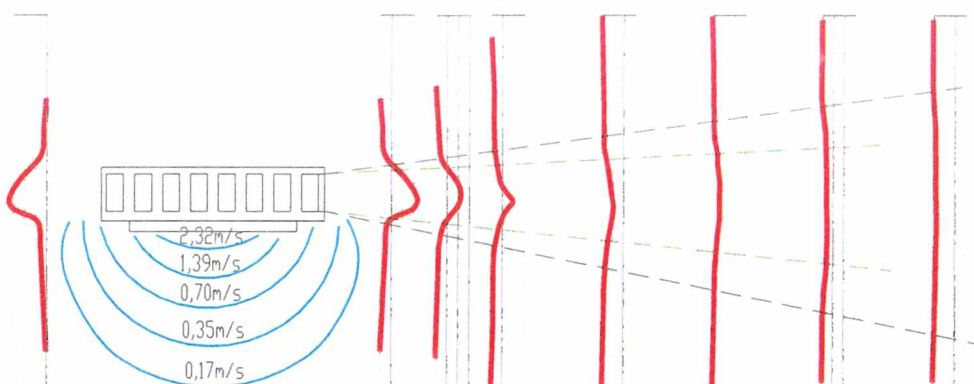
Z przedstawionych powyżej wykresów widać, że profile prędkości zasadniczo są zbliżone dla różnego rodzaju przesłon nawiewników promieniowych. Jednak tak przedstawione wykresy nie obrazują większości różnic, jakie występują przy różnego rodzaju badanych nawiewnikach promieniowych. Trudno jest określić zmianę różnicy w zasięgu w zależności od odległości od nawiewnika. Taki sposób przedstawienia wyników pomiarów dostarcza jedynie wiadomości na temat kształtu wypływu.

6.3. Widmo prędkości w odległości od nawiewnika

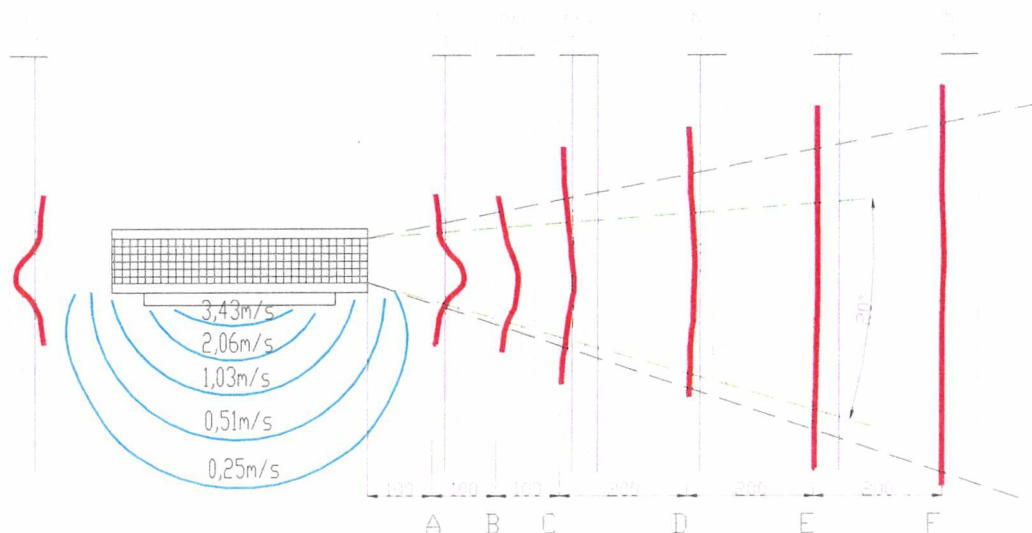
Dla lepszego zobrazowania widma prędkości powietrza wypływającego z nawiewnika przedstawiono profile prędkości w różnych odległościach od powierzchni wypływu. Takie przedstawienie wyników pozwala oszacować teoretyczny kąt rozptyłu strugi nawiewnej. Na rysunkach 6.2. ÷ 6.4 przedstawiono przykładowy profile rozkładu prędkości w poszczególnych odległościach od nawiewnika. Ponadto na rysunkach tych przedstawiono profil prędkości strug pierścieniowych dla różnie przesłoniętych otworów nawiewnych.



Rys. 6.2. Profil rozkładu prędkości strugi nawiewnej w poszczególnych odległościach od nawiewnika dla pierścienia nawiewnego NB1-60 i strumienia powietrza nawiewanego $V_n = 400\text{m}^3/\text{h}$



Rys. 6.3. Profil rozkładu prędkości strugi nawiewnej w poszczególnych odległościach od nawiewnika dla pierścienia nawiewnego NB2-90 i strumienia powietrza nawiewanego $V_n = 400\text{m}^3/\text{h}$



Rys. 6.4. Profil rozkładu prędkości strugi nawiewnej w poszczególnych odległościach od nawiewnika dla pierścienia nawiewnego o powierzchni perforowanej NB3 i strumienia powietrza nawiewanego $V_n = 600\text{m}^3/\text{h}$

Z przedstawionych powyżej przykładowych rysunków profili rozkładu prędkości w zależności od odległości od nawiewnika wynika jasno, iż geometria pierścienia nawiewnych decyduje o zasięgu strug nawiewnych. Na rysunkach 6.2. i 6.3 wyraźnie widać wpływ pochylenia szczelin nawiewnych na zasięg strugi. Porównując oba te rysunki widać, iż dla szczelin pochylnych pod kątem 60° w stosunku do dolnej płaszczyzny pierścienia nawiewnego i strumienia powietrza nawiewanego $V_n = 400\text{m}^3/\text{h}$ mamy większy zasięg strugi niż dla pierścienia nawiewnego z szerokimi szczelinami pionowymi gdy, $V_n = 400\text{m}^3/\text{h}$. Dla pozostałych pierścieni nawiewnych określenie, który z czynników geometrii decyduje o zasięgu strumienia nie jest tak oczywiste.

Brak możliwości pomiarów kierunku wektorów prędkości w strudze nawiewnej, spowodował, że kąt wyznaczony na podstawie rysunków jest wartością teoretyczną. W literaturze [56] dla strumieni wachlarzowych podano, iż kąt rozplywu strugi wynosi $\sim 20^\circ$ i jest on jednakowy dla całego profilu prędkości. Jednakże każdorazowo literatura [31,14,55,56] opisuje strugi nawiewne pierścieniowe, płaskie czy osiowosymetryczne ukierunkowane. Oznacza to, iż w obrębie nawiewnika następuje wyrównanie prędkości i wypływ jest w prawie poosiowy. W przypadku badanych zintegrowanych elementów nawiewno-wywiewnych brak jest tego obszaru. Wypływ kształtuje się dopiero po wyjściu z nawiewnika. Mimo to, profil prędkości pozwala wyznaczyć kąt wypływu strumienia.

Generalnie stwierdzić można, że dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi zauważa się dwa kąty graniczne strugi. Mniejszy z nich wynosi $\sim 15^\circ$, natomiast większy osiąga wartość $\sim 25^\circ$. Dla pierścieni nawiewnych perforowanych mniejszy kąt wypływu strugi to $\sim 20^\circ$, natomiast większy, podobnie jak dla pierścieni ze szczelinami, wynosi $\sim 35^\circ$. W literaturze nie spotyka się tak szerokich zakresów strug nawiewnych. Zdecydowanie największy kąt granicznych strug nawiewnych osiągają strumienie wypływające ze szczelin o długości nieskończonej, który wynosi ok. 33° [55]. Obszar zawarty pomiędzy obydwojema kątami granicznymi jest obszarem mieszania się strumienia powietrza nawiewanego ze strumieniem powietrza z pomieszczenia.

6.4. Maksymalne prędkości względne

W literaturze [14,30,55,56] strugi nawiewne podzielone są na strefy różniące się charakterem zmian prędkości powietrza w funkcji odległości od nawiewnika, by powyższe wyznaczyć w badanych strumieniach określono maksymalne prędkości względne zdefiniowane zależnością:

$$v_w^{\max} = \frac{v_{\max}}{v_{\text{netto}}} \quad (6.1.)$$

gdzie:

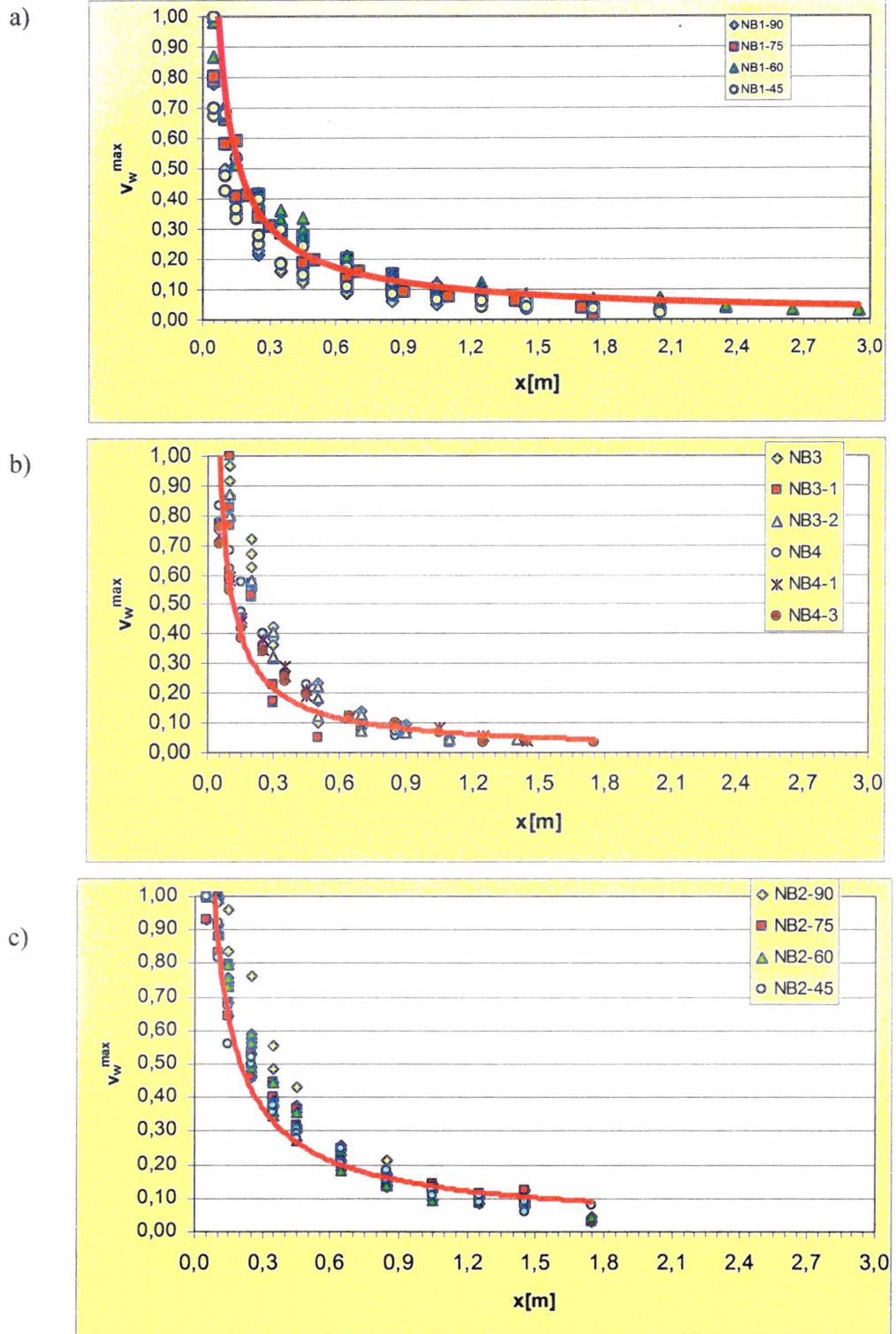
$v_w^{\max}$ - maksymalna prędkość względna,

$v_{\max}$ - maksymalna prędkość średnia w danej odległości od nawiewnika; m/s,

v_{netto} - prędkość w otworze netto; m/s,

Pozwoliło to na dokładniejsze określenie charakteru przepływu oraz zasięgu strugi.

Dla wszystkich pierścieni nawiewnych oraz strumieni nawiewnych ($250\text{m}^3/\text{h}$, $400\text{m}^3/\text{h}$, $600\text{m}^3/\text{h}$) wytypowano maksymalne prędkości średnie a następnie, wg wzoru 6.1. obliczono maksymalne prędkości względne.



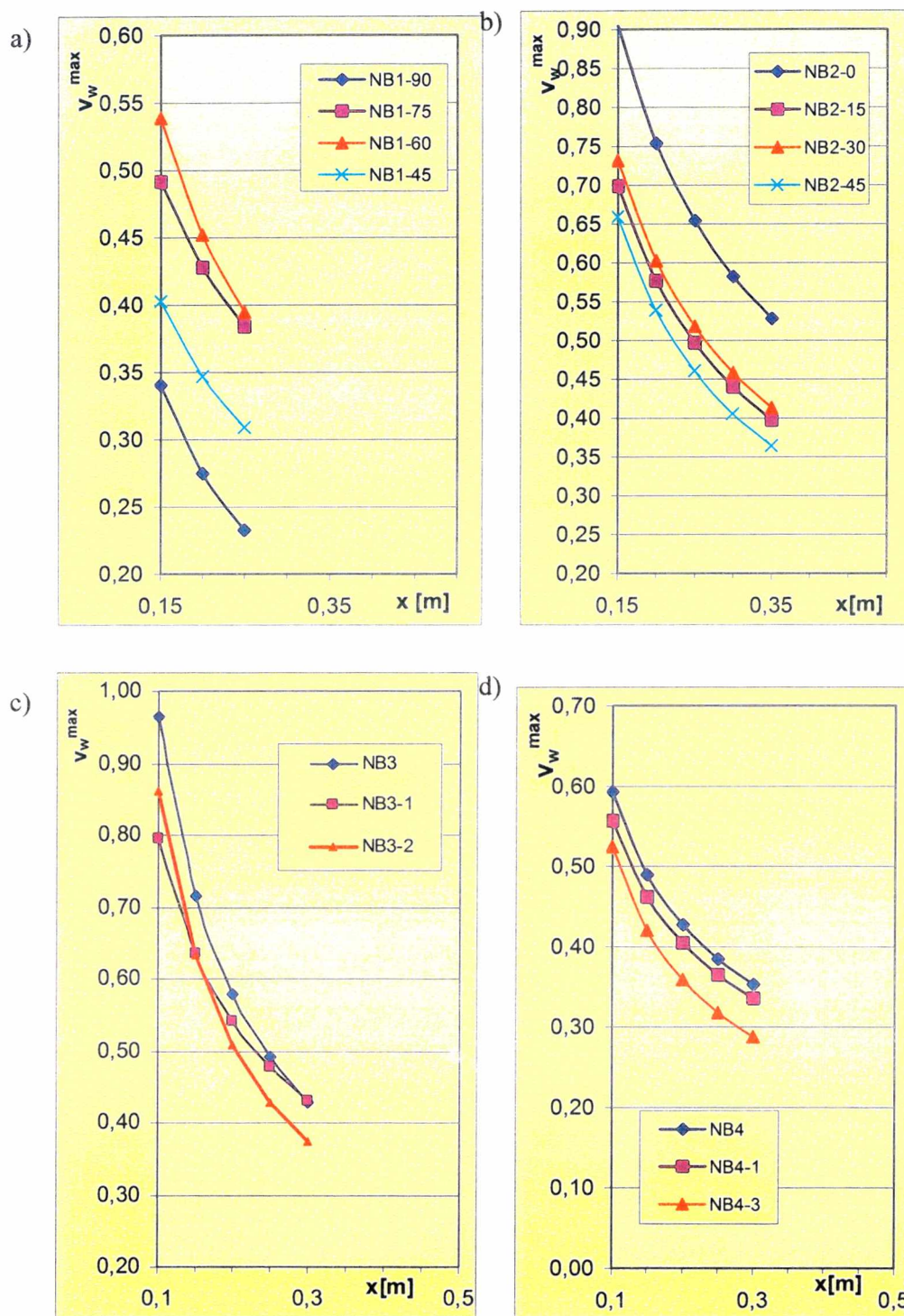
Rys. 6.6. Wykresy maksymalnych prędkości względnych dla a) pierścieni nawiewnych ze szczelinami wąskimi (NB1); b) pierścieni nawiewnych ze szczelinami szerokimi (NB2); pierścieni nawiewnych o płaszczyznach perforowanych (NB3 i NB4).

Rysunek 6.6 przedstawia wykresy maksymalnych prędkości względnych dla poszczególnych płyt nawiewnych. Na wszystkich wykresach, celem ułatwienia wyznaczenia stref w strugach nawiewnych, przedstawiono linię trendu, która pokazuje ogólny charakter zmian maksymalnych prędkości względnych w funkcji odległości od nawiewnika dla różnego rodzaju pierścieni. Łatwo zauważyć, że kształt wpływu niezależnie od stopnia jak i rodzaju perforacji jest podobny, a jego charakter zbliżony jest do parabolicznego. Dla wszystkich rodzajów płyt wyraźnie zauważalna jest możliwość podziału strugi na dwie strefy – przejściową i główną. Dla celów wentylacji najważniejszą jest strefa ostania – główna, ale z uwagi na brak szczegółowych prac dotyczących nawiewów pierścieniowych w dalszej części pracy omówiona będzie także strefa przejściowa.

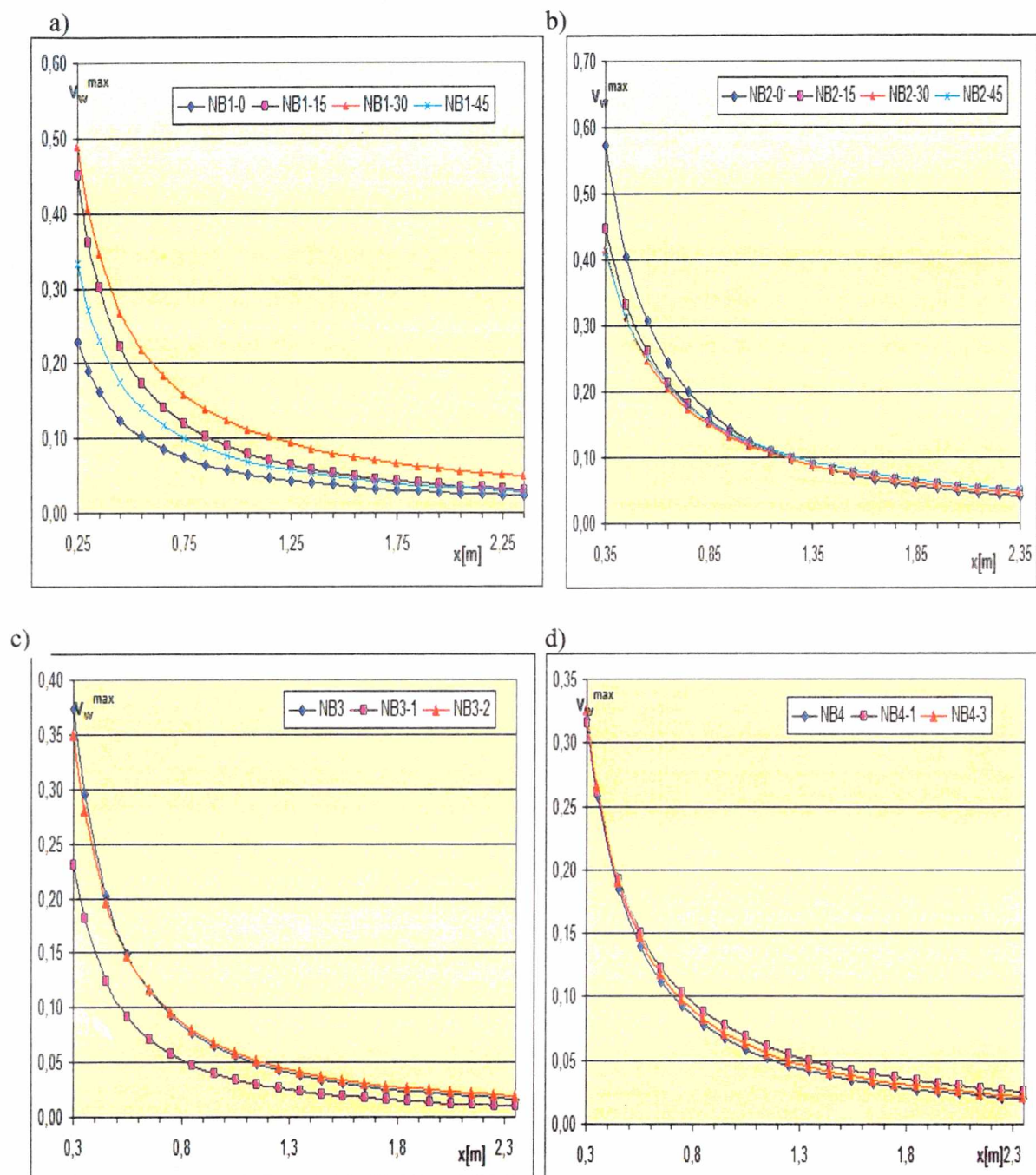
Przed przystąpieniem do dokładnej analizy statystycznej wyników pomiarów wykonano wstępną analizę maksymalnych prędkości względnych.

Dla każdego pierścienia nawiewnego granice stref określono na podstawie wykresów maksymalnych prędkości względnych. W celu określenia odległości, która jest granicą stref dla każdego z pierścieni wyznaczano krzywą regresji prostej potęgowej. Założono, że wyznaczona x_{gr} (odległość graniczna) jest prawidłowa gdy największe są współczynniki korelacji R zarówno dla strefy głównej jak i przejściowej. Na rysunkach 6.7. oraz 6.8. przedstawiono wykresy maksymalnych prędkości względnych dla poszczególnych pierścieni nawiewnych z podziałem na dwie strefy – przejściową i główną.

Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 6.7. wyraźnie widać jak mało stabilna jest strefa przejściowa. Trudno tu zauważyć jakiegokolwiek podobieństwa i związki dla pierścieni nawiewnych. Dla przykładu porównując maksymalne prędkości względne dla płyt NB1 i NB2 nie sposób jest określić, który kąt pochylenia szczelin jest optymalny. Wykres a) pozwala stwierdzić, iż najlepsze rezultaty daje pochylenie szczelin pod kątem 60° do dolnej krawędzi nawiewnika, zaś najgorszy kąt tegoż pochylenia to 90° . Jednocześnie dla szczelin NB2 optymalnymi wydają się być szczeliny o kącie nachylenia 90° , zaś zdecydowanie najgorsze rezultaty osiągają szczeliny o kącie nachylenia 45° . Tak więc, w strefie przejściowej, w zależności od stopnia perforacji zmienia się wpływ kąta pochylenia szczelin na zasięg strumienia. Nie popełniając zbyt dużego błędu, na podstawie rysunku 6.7. określono, iż dla wszystkich przesłon odległość graniczna – to ok. 0,3 m od nawiewnika.



Rys.6.7. Wykresy maksymalnych względnych prędkości w strefie przejściowej w funkcji odległości od nawiewnika dla a) pierścieni NB1; b) pierścieni NB2; c) pierścieni NB3; d) pierścieni NB4.



Rys. 6.8. Wykresy maksymalnych prędkości względnych w strefie głównej w funkcji odległości od nawiewnika dla a) pierścieni NB1; b) pierścieni NB2; c) pierścieni NB3; d) pierścieni NB4.

Dla strefy głównej wpływ powietrza z poszczególnych pierścieni jest bardziej ustabilizowany. Ponadto z przedstawionych wykresów (rys 6.8) wynika, że dla szczelin wąskich (NB1) wyraźny jest wpływ kąta pochylenia szczelin (względem dolnej krawędzi nawiewnika). Natomiast przy szczelinach szerokich (NB2) wpływ ten zauważalny jest na

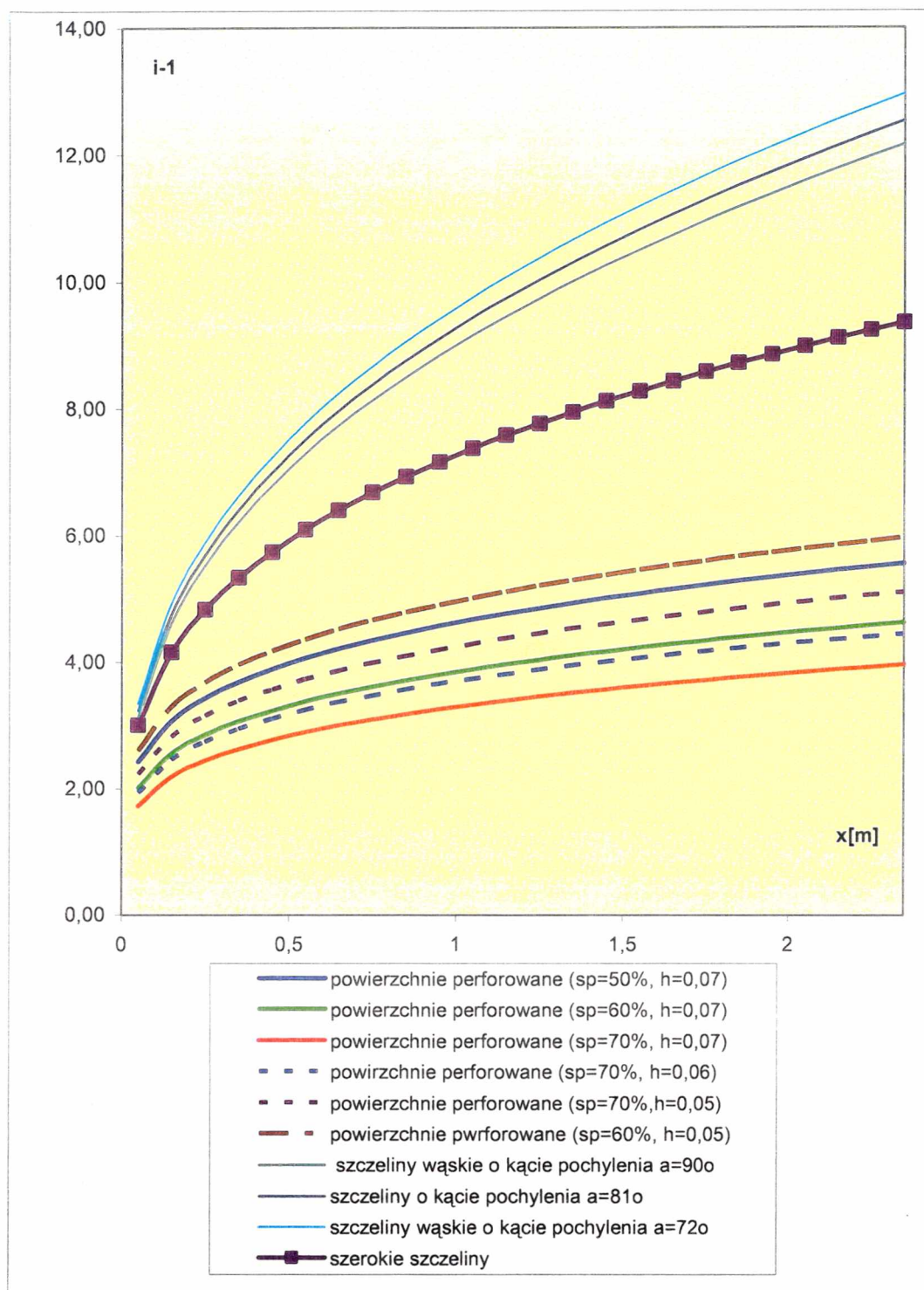
przejściu ze strefy przejściowej do głównej. W rozwiniętej części strefy głównej nie obserwuje się już wpływu omawianego kąta na zasięg strugi. Przy wypływie z powierzchni perforowanych zmiana ich wysokości zasadniczo nie wpływa na zasięg strumienia. Jego niewielkie ograniczenie obserwuje się dla pierścienia NB3-1. Jest to wynik nie unormowanego wypływu powietrza z nawiewnika. Przy dużym stopniu perforacji (70%) zasłonięcie dolnej części wypływu spowodowało zaburzenie wypływu, w konsekwencji ograniczenie zasięgu strumienia. Efekt ten jest niezauważalny dla pierścienia o mniejszym stopniu perforacji. Zasłonięcie górnej części wypływu nie daje istotnych zmian w zasięgu strumienia.

6.5. Stopnie mieszania

Bardzo ważną wielkością opisującą strugi nawiewne jest stopień indukcji lub stopień mieszania, które oblicza się z zależności 3.14 i 3.15. Stopień mieszania pozwala ocenić, jaka część powietrza z pomieszczenia jest indukowana przez powietrze nawiewane.

Na bazie analiz, przeprowadzonych dla wszystkich przebadanych strumieni nawiewnych, określono charakter tych zdolności zarówno dla pierścieni z wąskimi i szerokimi szczelinami, jak i dla pierścieni o powierzchniach perforowanych. Uzyskane wyniki pozwalają precyzyjnie określić, które pierścienie nawiewne należy stosować dla kształtowania wypływu powietrza w zależności od rodzaju, funkcji oraz wyposażenia pomieszczeń.

Poniżej na rysunku 6.9 przedstawiono wykres stopni mieszania w funkcji odległości od powierzchni wypływu dla poszczególnych powierzchni nawiewnych. Wykres ten daje pełen obraz zdolności indukcyjnych powietrza wypływającego z poszczególnych pierścieni nawiewnych.



Rys.6.9 Wykresy stopni zmieszania w funkcji odległości od otworu nawiewnego dla różnych pierścieni nawiewnych.

Największe stopnie zmieszania, a zatem najlepsze zdolności indukcyjne wykazują pierścienie ze szczelinami wąskimi, z których najbardziej efektywne są pierścienie ze szczelinami o znacznym stopniu pochylenia. Dla szczelin pionowych stopnie zmieszania są nieco mniejsze w porównaniu ze szczelinami pochyłymi. Dla takich powierzchni wypływu odnotowano również największe zasięgi.

Mniejsze zdolności indukcyjne posiadają strumienie powietrza wypływającego z powierzchni ze szczelinami szerokimi. Charakteryzują się one większym stopniem otwarcia a co za tym idzie większym skupieniem strugi nawiewnej. W oparciu o wyniki badań można stwierdzić, iż kąt pochylenia szczelin szerokich nie ma wpływu na stopień indukcji jak i maksymalne prędkości powietrza w strudze nawiewnej.

Najmniejsze zdolności indukcyjne wykazały strumienie powietrza wypływającego z powierzchni perforowanych. Zmiany tych powierzchni pozwalały na uzyskiwanie wartości stopni zmieszania, jednak nigdy nie były zbliżone do tych osiąganych przez powierzchnie ze szczelinami nawiewnymi. Należy zauważyć, że struga nawiewna wypływająca przez powierzchnie perforowane jest skupiona. Zatem im mniejszy jest stopień otwarcia oraz im mniejsza wysokość otworu nawiewnego, tym lepsze są zdolności indukcyjne powietrza nawiewanego. Jest to efektem większych prędkości wypływu powietrza, a zatem większego stopnia turbulencji zarówno na wypływie jak i przepływie powietrza nawiewanego w pomieszczeniu.

7. STATYSTYCZNE OPACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

7.1. Prędkości maksymalne w strugach nawiewnych

7.1.1 Uwagi wstępne

Na podstawie przedstawionych i omówionych w rozdziale 6 wyników badań określono charakter wypływu powietrza z nawiewnika pierścieniowego i wytypowano dwie strefy charakterystyczne – przejściową i główną. Statystyczne opracowanie wyników badań pozwoliło wyprowadzić formuły matematyczne opisujące badane zjawiska. Określono, jakie czynniki mają wpływ na zasięg strugi wypływającej z nawiewnika pierścieniowego.

Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, iż na wartość maksymalnej prędkości względnej ($v_w^{\max} = \frac{v_{\max}}{v_{\text{netto}}}$) dla wszystkich badanych pierścieni nawiewnych wpływ mają:

a) dla pierścieni nawiewnych ze szczelinami NB1 i NB2:

- odległość od nawiewnika – x ; m,
- stopień otwarcia pierścienia nawiewnego $s_p = \frac{F_{\text{netto}}}{F_{\text{brutto}}}$,
- stosunek kąta pochylenia szczelin względem kierunku rozptywu powietrza - $\frac{\alpha}{90^\circ}$.

b) dla pierścienie nawiewne o powierzchniach perforowanych NB3 i NB4:

- odległość od nawiewnika – x ; m,
- stopień perforacji pierścienia nawiewnego $s_p = \frac{F_{\text{netto}}}{F_{\text{brutto}}}$,

Wyniki badań oraz przedstawione w rozdziale 6 wykresy wskazywały, iż czynna wysokość otworu (h), nie ma wpływu na maksymalne prędkości względne. Mimo to metodami statystycznymi spróbowano potwierdzić tę tezę.

Dla określonych zmiennych zależnych i niezależnych opracowano równanie empiryczne opisujące prędkość powietrza nawiewanego w pomieszczeniu. Dla ułatwienia przedstawiono zależności w taki sposób, aby opisywały zarówno strefę przejściową jak i

główną. Zróżnicowanie stref, wynikające z różnych wartości współczynników regresji, przedstawione zostanie w dalszej części opracowania.

a) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi:

$$v_w^{\max} = f(x, F_{brutto}, F_{netto}, \alpha, h) \quad (7.1)$$

b) dla pierścieni z powierzchnią perforowaną:

$$v_w^{\max} = f(x, F_{brutto}, F_{netto}, h) \quad (7.2)$$

Funkcje opisane wzorami 7.1 i 7.2 przedstawiono w postaci następujących formuł empirycznych:

a) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi:

$$v_w^{\max} = b_0 \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ} \right)^{b_3} \quad (7.3)$$

gdzie:

s_p - stopień otwarcia otworu nawiewnego, $s_p = \frac{F_{netto}}{F_{brutto}}$,

b) dla pierścieni z powierzchnią perforowaną:

$$v_w^{\max} = b_0 \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot h^{b_3} \quad (7.4)$$

Oznaczenia jak dla 7.3.

7.1.2. Współczynniki korelacji oraz regresji

W celu określenia wartości współczynników b_0 , b_1 , b_2 oraz b_3 wykorzystano metodę wielokrotnej regresji liniowej. Zatem formuły 7.3 i 7.4 należało sprowadzić do równań liniowych zapisanych w postaci :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (7.5)$$

W tym celu równania 7.3 i 7.4 obustronnie logarytmowano:

a) dla pierścieni ze szczelinami:

$$v_w^{\max} = b_0 \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ} \right)^{b_3} \Big|^{\ln} \quad (7.6)$$

b) dla pierścieni z powierzchnią perforowaną:

:

$$v_w^{\max} = b_0 \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot h^{b_3} \Big|^{\ln} \quad (7.7)$$

i po przekształceniu otrzymano następujące postacie równań:

a) dla pierścieni ze szczelinami:

$$\ln(v_w^{\max}) = \ln(b_0) + b_1 \ln(x) + b_2 \ln(s_p) + b_3 \ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right) \quad (7.8)$$

b) dla pierścieni z powierzchnią perforowaną:

$$\ln(v_w^{\max}) = \ln(b_0) + b_1 \ln(x) + b_2 \ln(s_p) + b_3 \ln(h) \quad (7.9)$$

W celu uproszczenia formuły 7.8 i 7.9 przyjęto następujące oznaczenia:

a) pierścienie ze szczelinami:

$$y = \ln(v_w^{\max});$$

$$b = \ln(b_0)$$

$$x_1 = \ln(x);$$

$$x_2 = \ln(s_p);$$

$$x_3 = \ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)$$

Zatem wzór 7.8 można zapisać następująco:

$$y = b + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (7.10)$$

b) pierścienie perforowane:

$$y = \ln(v_w^{\max});$$

$$b = \ln(a_0)$$

$$x_1 = \ln(x);$$

$$x_2 = \ln(s_p);$$

$$x_3 = \ln(h)$$

zatem wzór 7.9 można zapisać:

$$y = b + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (7.11)$$

Zarówno dla pierścieni nawiewnych ze szczelinami jak perforowanych zmienne x_1 , x_2 , i x_3 są zmiennymi niezależnymi zaś y zmienną zależną.

W celu obliczenia współczynników b , b_1 , b_2 i b_3 zastosowano metodę wielokrotnej regresji liniowej udostępnionej przez program z pakietu Microsoft Office – EXCEL 2002 z dodatkiem do obliczeń statystycznych Analysis ToolPack. Program ten pozwala na opracowywanie zbiorów danych przy pomocy różnych metod statystycznych, a m.in. za pomocą regresji liniowej wielokrotnej.

Z uwagi na dość obszerne opracowanie oraz znaczną liczbę przybliżeń, które miały na celu wyeliminowanie współczynników nieistotnych, w opracowaniu zostaną przedstawione jedynie wyniki końcowe, które umożliwiły matematyczny opis zjawiska rozplywu strugi nawiewnej pierścieniowej. Wszystkie obliczenia wykonywano dla przedziału ufności $\alpha = 0,05$ [17]. Czynniki nieistotne eliminowano na podstawie weryfikacji hipotezy zerowej $H_0: b_i = 0$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: b_i \neq 0$. Dla każdego współczynnika regresji b_i postawiono hipotezę zerową $H_0: b_i = 0$. Na podstawie wzoru 7.12 obliczano wartości statystyk t :

$$t = \frac{b_i - 0}{S_{b_i}} \quad (7.12)$$

gdzie:

b_i – wartość i – tego współczynnika regresji,

S_{b_i} – odchylenie standardowe i – tego współczynnika regresji.

Uzyskane wartości t porównywano z wartościami krytycznymi t_α odczytywanymi z tablic matematycznych. W tabeli 7.1 zestawiono wartości t oraz odchylenia standardowe dla

poszczególnych współczynników b , b_1 , b_2 i b_3 . W tabeli 7.1 zestawiono wszystkie współczynniki zmiennych niezależnych. W sytuacji, gdy przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, iż współczynniki te są nieistotne, wówczas w tabeli oznaczono je krzyżykami.

Tabela 7.1 Zestawienie wartości statystyk t oraz odchyleń standardowych dla pierścieni nawiewnych.

Pierścień nawiewny	Współczynniki regresji							
	b		b_1		b_2		b_3	
	S_b	t Stat	S_{b1}	t Stat	S_{b2}	t Stat	S_{b3}	t Stat
STREFA PRZEJŚCIOWA								
NB1	0,094	-21,2	0,046	-13,2	x	x	x	x
NB1 oprócz NB1-45°	0,075	-29,24	0,034	-18,00	x	x	0,136	-8,03
NB2	0,055	-28,02	0,033	-19,44	x	x	x	x
NB1 i NB2	0,062	-17,45	0,030	-20,50	0,050	14,38	x	x
NB3 i NB4	0,065	-13,38	0,026	-18,61	0,075	14,66	x	x
STREFA GŁÓWNA								
NB1	0,038	-63,427	0,063	-16,07	x	x	x	x
NB1 oprócz NB1-45°	0,056	-50,79	0,042	-27,21	x	x	0,176	-10,84
NB2	0,021	-99,65	0,035	-33,31	x	x	x	x
NB1 i NB2	0,056	-30,78	0,035	-30,94	0,056	9,57		
NB3 i NB4	0,04	-63,22	0,06	-20,47	x	x	x	x

Do analizy istotności współczynników korelacji wykorzystano test F (Fishera – Snedecora). Wartość tego testu obliczono na podstawie zależności opisanej zależnością [17]:

$$F = \frac{R^2 \cdot (n - k - 1)}{(1 - R^2) \cdot k} \quad (7.13)$$

gdzie:

R – współczynnik korelacji,

n – liczba badań,

k – liczba zmiennych niezależnych.

W tabeli 7.2. przedstawiono współczynniki korelacji oraz regresji dla poszczególnych pierścieni nawiewnych. Jeżeli, któraś ze zmiennych została wyeliminowana jako zmienna nie mająca wpływu na zmienną zależną, wówczas w tabeli współczynnik regresji dla tej zmiennej przedstawiono jako 0.

Tabela 7.2. Zestawienie współczynników regresji i korelacji dla pierścieni nawiewnych.

Pierścień nawiewny	Współczynniki regresji				Wsp. korelacji	Test Fischera
	b	b ₁	b ₂	b ₃	R	F
STREFA PRZEJŚCIOWA						
NB1	-1,989	-0,613	0	0	0,88	175
NB1 bez kąta 45°	-2,184	-0,609	0	-1,094	0,96	188
NB2	-1,546	-0,637	0	0	0,93	378
NB1 i NB2	-1,077	-0,609	0,713	0	0,91	258
NB3 i NB4	-0,875	-0,487	1,10	0	0,96	240
STREFA GŁÓWNA						
NB1	-2,398	-1,008	0	0	0,88	258
NB1 bez kąta 45°	-2,870	-1,150	0	-1,90	0,96	370
NB2	-2,059	-1,174	0	0	0,96	1109
NB1 i NB2	-1,711	-1,089	0,540	0	0,93	585
NB3 i NB4	-2,753	-1,308	0	0	0,93	419

Zestawienie współczynników regresji i korelacji daje pełny obraz tego, które z nich są istotne. Analiza statystyczna wykazała, że:

- zdecydowanie najważniejszym współczynnikiem decydującym o wartości maksymalnej prędkości względnej jest odległość od nawiewnika x ,
- dla pierścieni ze szczelinami oraz perforowanych istotny jest także stopień otwarcia s_p . Przy czym istotnym jest, że dla pierścieni perforowanych w strefie głównej stopień otwarcia nie ma wpływu na wartość maksymalnej prędkości względnej.

- Kąt pochylenia szczelin ma niewielki wpływ na maksymalne prędkości względne przy pierścieniach NB1 bez uwzględniania NB1-45.
- dla wszystkich pierścieni nawiewnych ze szczelinami nawiewnymi kąt pochylenia nie wykazuje istotnego wpływu na maksymalne prędkości względne.

7.1.3 Formuły obliczeniowe dla maksymalnych prędkości względnych

Po przekształceniu wzorów oraz po podstawieniu odpowiednich współczynników regresji uzyskano następujące wzory empiryczne opisujące zależności pomiędzy poszczególnymi wielkościami. Wzory te mogą być stosowane do obliczania maksymalnych prędkości strugi w odległości od nawiewnika. Każda z formuł dotyczy odpowiedniej strefy – przejściowej lub głównej. Wzory te pogrupowano i w części I przedstawiono formuły dla strefy przejściowej a w części II – dla strefy głównej najważniejszej przy rozptyłach powietrza w pomieszczeniach.

CZĘŚĆ I – strefa przejściowa

1. Pierścienie nawiewne ze szczelinami wąskimi (NB1-90, NB1-75, NB1-60, NB1-45):

$$v_{\max} = \frac{0,137 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{0,613}} \quad (7.14)$$

2. Pierścienie nawiewne ze szczelinami wąskimi (NB1-90, NB1-75, NB1-60):

$$v_{\max} = \frac{0,114 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{0,603} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{1,079}} \quad (7.15)$$

3. Pierścienie nawiewne ze szczelinami szerokimi (NB2-90, NB2-75, NB2-60, NB2-45):

$$v_{\max} = \frac{0,213 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{0,637}} \quad (7.16)$$

4. Pierścienie nawiewne ze szczelinami NB1 i NB2:

$$v_{\max} = \frac{0,341 \cdot v_{\text{netto}} \cdot s_p^{0,713}}{x^{0,609}} \quad (7.17)$$

5. Pierścienie nawiewne o płaszczyznach perforowanych NB3 i NB4:

$$v_{\max} = \frac{0,417 \cdot v_{\text{netto}} \cdot s_p^{1,1}}{x^{0,487}} \quad (7.18)$$

CZĘŚĆ II – strefa główna

1. Pierścienie nawiewne ze szczelinami wąskimi (NB1-90, NB1-75, NB1-60, NB1-45):

$$v_{\max} = \frac{0,091 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,008}} \quad (7.19)$$

2. Pierścienie nawiewne ze szczelinami wąskimi (NB1-90, NB1-75, NB1-60):

$$v_{\max} = \frac{0,057 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,15} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{1,90}} \quad (7.20)$$

3. Pierścienie nawiewne ze szczelinami szerokimi (NB2-90, NB2-75, NB2-60, NB2-45):

$$v_{\max} = \frac{1,128 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,174}} \quad (7.21)$$

4. Pierścienie nawiewne ze szczelinami NB1 i NB2:

$$v_{\max} = \frac{1,81 \cdot v_{\text{netto}} \cdot s_p^{0,54}}{x^{1,089}} \quad (7.22)$$

5. Pierścienie nawiewne o płaszczyznach perforowanych NB3 i NB4:

$$v_{\max} = \frac{0,064 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,308}} \quad (7.23)$$

Wszystkie wzory 7.14÷7.23 zostały określone na podstawie pomiarów prędkości powietrza w pomieszczeniu dla strumieni powietrza nawiewanego w granicach:

$$250\text{m}^3/\text{h} \geq V_n \leq 600\text{m}^3/\text{h}.$$

Zatem są ważne dla następujących zakresów zmienności parametrów:

a) pierścienie nawiewne ze szczelinami:

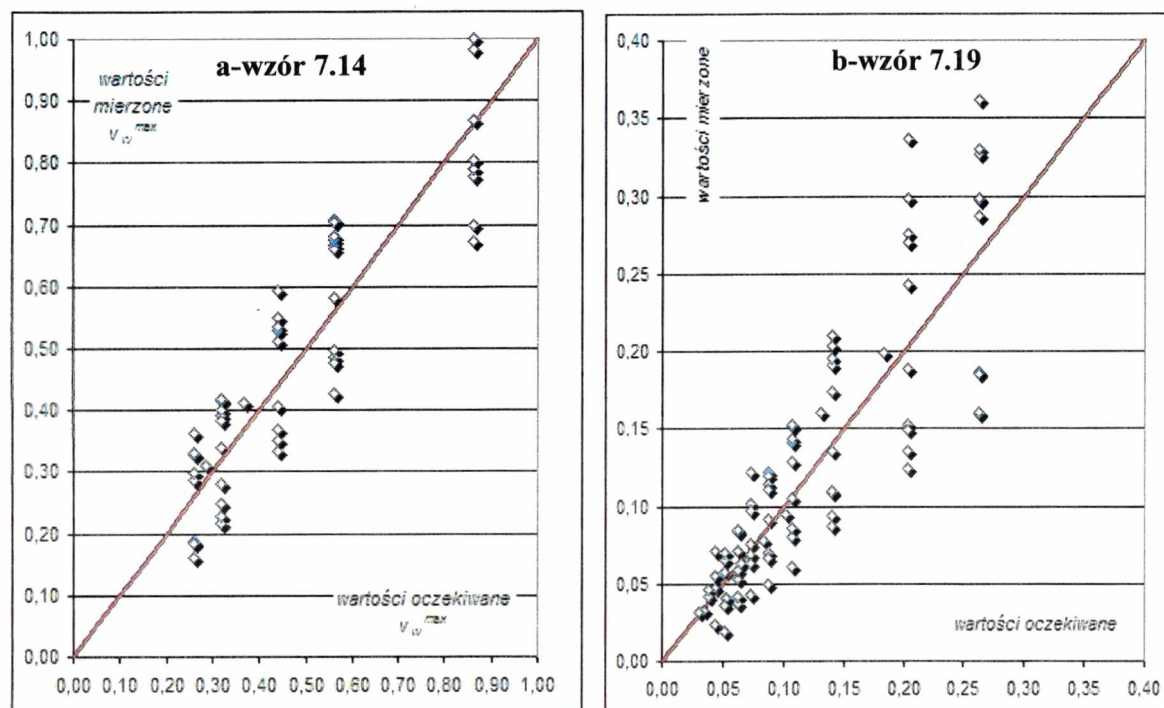
Wielkość	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
V_{netto}	1,44 m/s	6,90 m/s
$X_{\text{str.przejściowa}}$	0,05 m	0,35 m
$X_{\text{str.główna}}$	0,35 m	3,00 m
S_p	27%	55%
h	0,07	
$\frac{\alpha}{90^\circ}$	0,67	1

b) pierścienie o płaszczyźnie perforowanej:

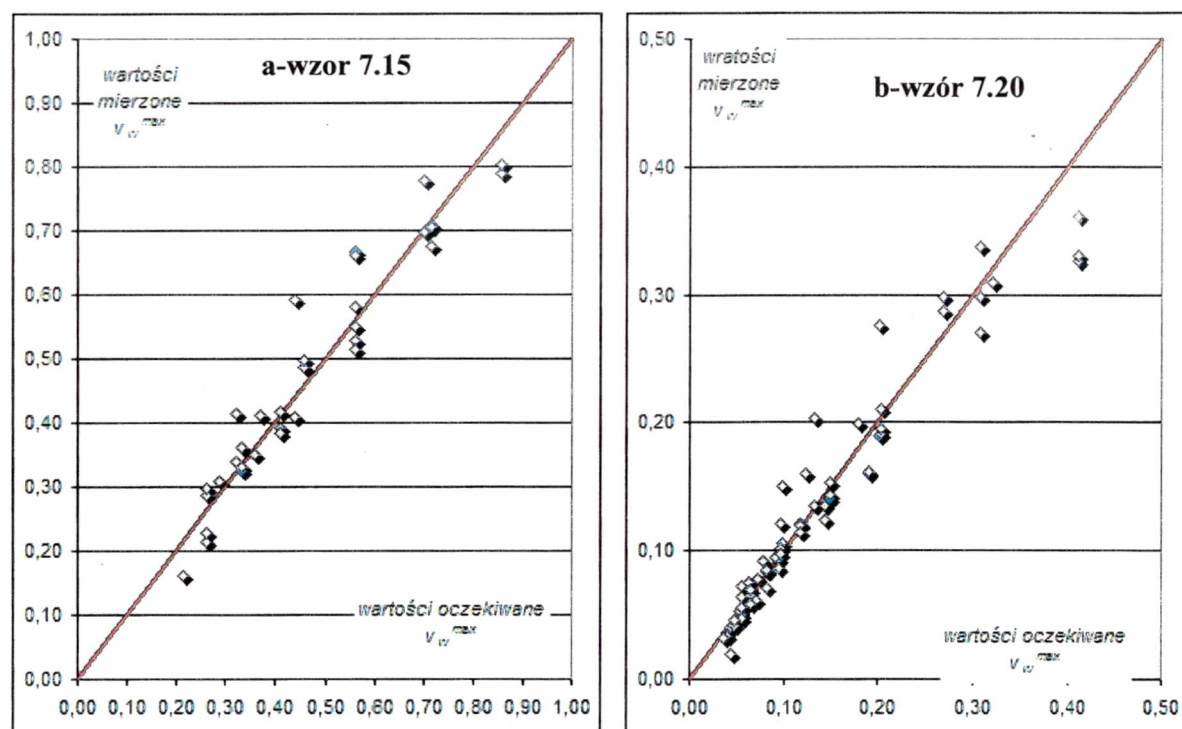
	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
V_{netto}	1,11 m/s	5,02m/s
$X_{\text{str.przejściowa}}$	0,05 m	0,35 m
$X_{\text{str.główna}}$	0,35 m	3,00 m
S_p	47%	71%
h	0,04	0,07

7.1.4. Graficzne zobrazowanie wyników analizy statystycznej:

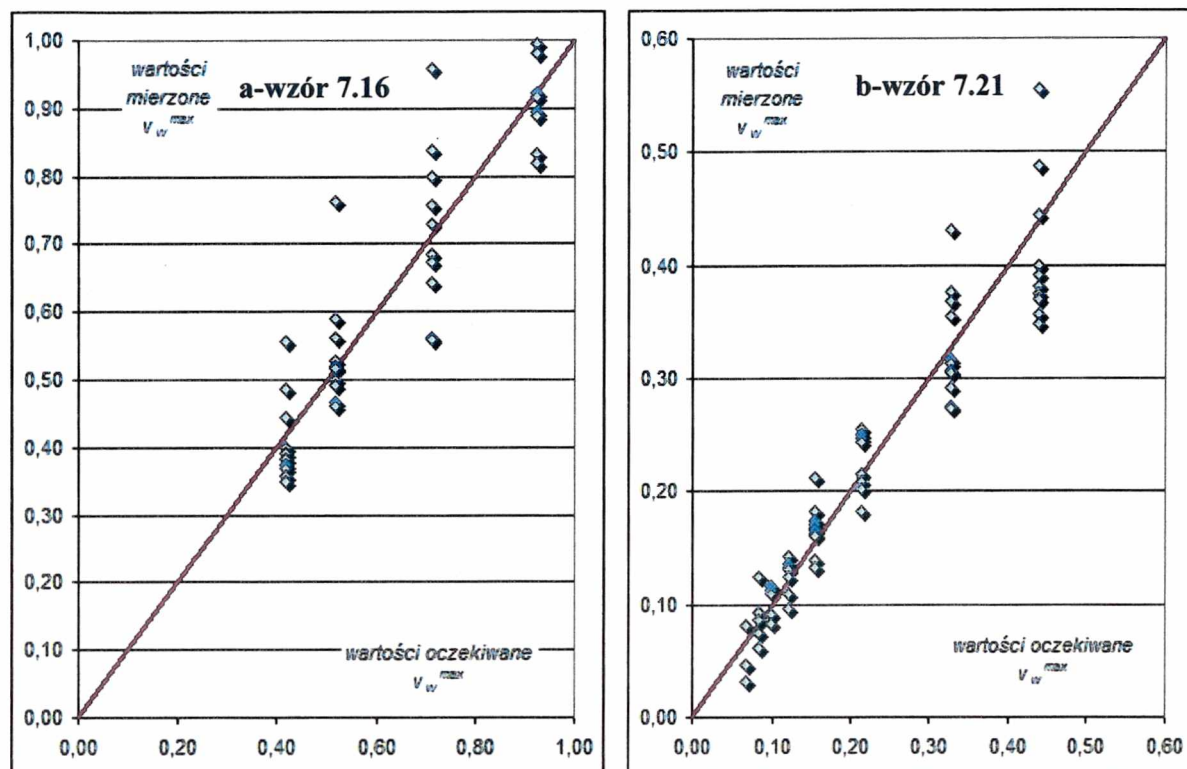
Wyniki analizy statystycznej zobrazowano na rysunkach 7.1 ÷ 7.5.



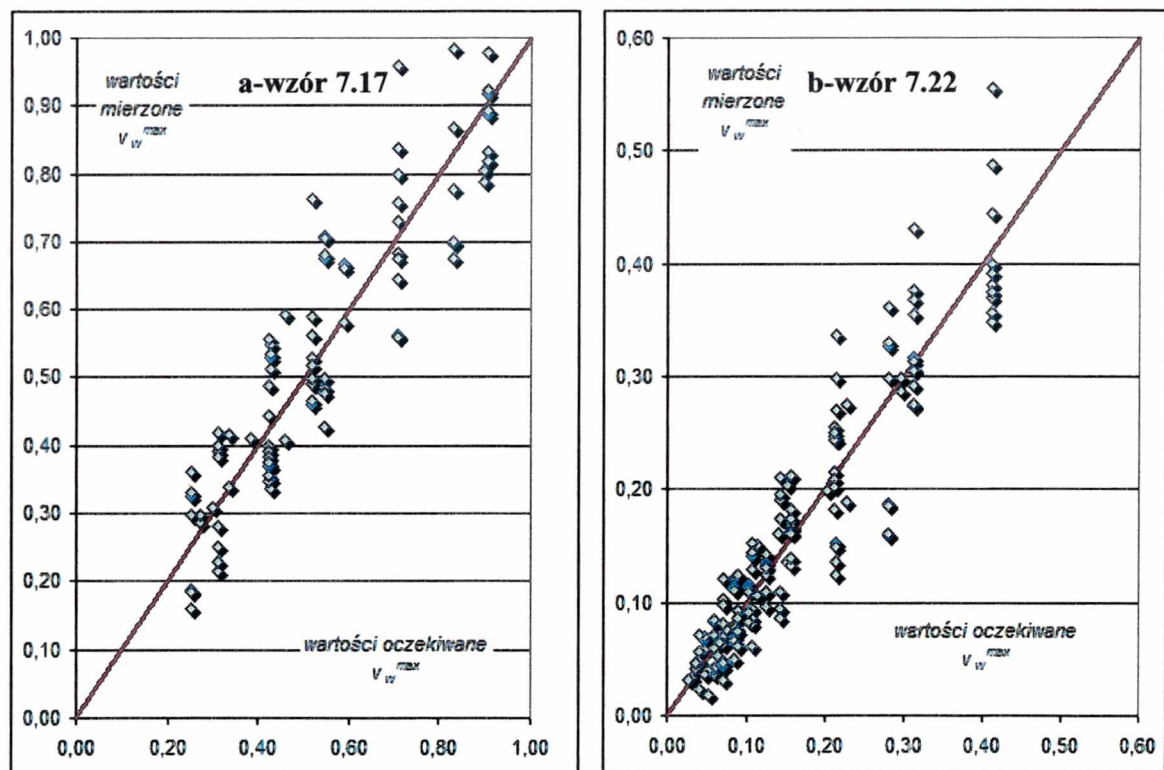
Rys.7.1. Wykres wartości mierzonych w funkcji wartości oczekiwanych dla a)strefy przejściowej b)strefy głównej



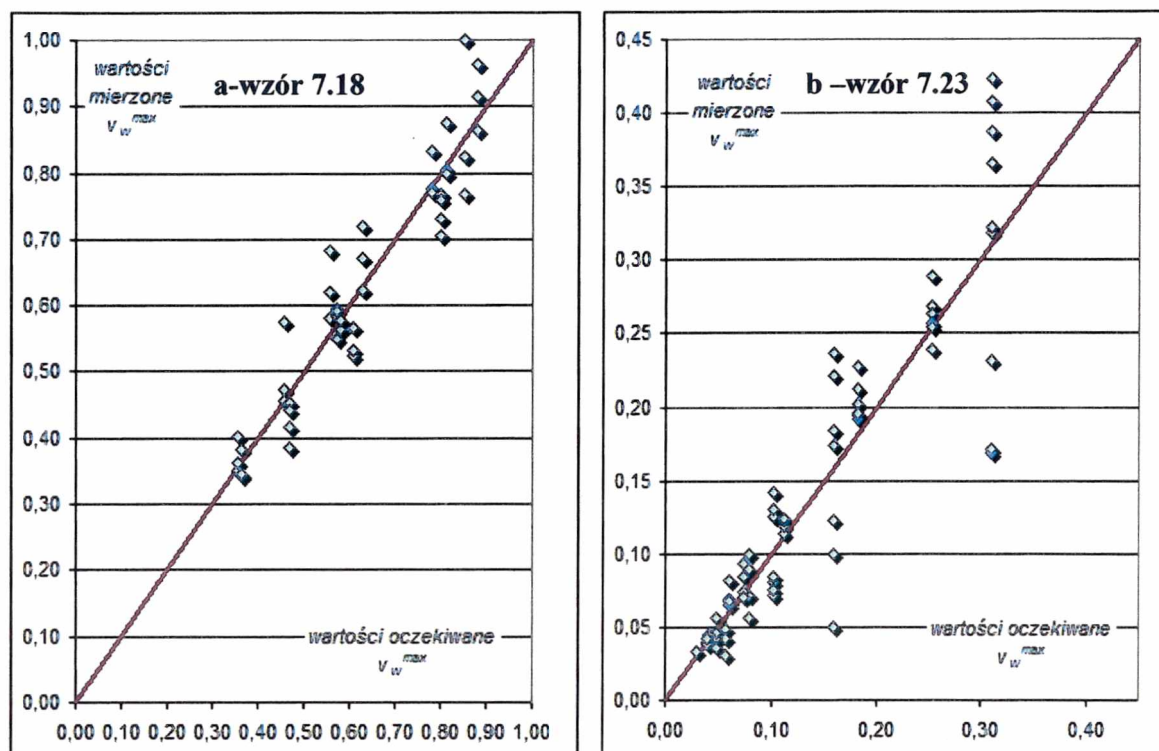
Rys.7.2. Wykres wartości mierzonych w funkcji wartości oczekiwanych dla a)strefy przejściowej b)strefy głównej



Rys. 7.3. Wykres wartości mierzonych w funkcji wartości oczekiwanych dla a)strefy przejściowej b)strefy głównej



Rys. 7.4. Wykres wartości mierzonych w funkcji wartości oczekiwanych dla a)strefy przejściowej b)strefy głównej



Rys.7.5. Wykres wartości mierzonych w funkcji wartości oczekiwanych dla a)strefy przejściowej b)strefy głównej

7.2. Stopnie zmieszania

7.2.1. Uwagi ogólne

Przedstawione w rozdziale 6 wyniki badań wykazały, iż wartość stopnia zmieszania -

$$i - 1 = \frac{V}{V_0} - \text{zależy od konstrukcji pierścieni nawiewnych. Poniżej dla poszczególnych}$$

konstrukcji pierścieni nawiewnych wyszczególniono zaobserwowane zmienne wpływające na wartość stopnia zmieszania.

a) dla pierścieni nawiewnych ze szczelinami wąskimi NB1:

- odległość od nawiewnika – x; m,
- stosunek kąta pochylenia szczelin do jej dolnej krawędzi;
- - α .

b) dla pierścieni nawiewnych ze szczelinami szerokimi NB2

- odległość od nawiewnika – x ; m,

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

- odległość od nawiewnika – x ; m,
- stopień perforacji pierścienia nawiewnego $s_p = \frac{F_{netto}}{F_{brutto}}$,

Dla poszczególnych rodzajów pierścieni nawiewnych opracowano ogólne zależności opisujące stopnie zmieszania w funkcji zmiennych niezależnych. Wzory te zapisano następująco:

a) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi wąskimi NB1:

$$i - 1 = f\left(x, \frac{\alpha}{90^\circ}\right) \quad (7.24)$$

b) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi szerokimi NB2:

$$i - 1 = f(x) \quad (7.25)$$

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

$$i - 1 = f(x, s_p, h) \quad (7.26)$$

Funkcje opisane wzorami 7.24, 7.25 i 7.26 przedstawiono w postaci następujących formuł empirycznych:

a) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi wąskimi NB1:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{b_2} \quad (7.27)$$

b) dla pierścieni ze szczelinami nawiewnymi szerokimi NB2:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \quad (7.28)$$

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot h^{b_3} \quad (7.29)$$

7.2.2. Współczynniki korelacji oraz regresji

W celu określenia wartości współczynników b_0 , b_1 , b_2 oraz b_3 zastosowano metodę wielokrotnej regresji liniowej. Zatem formuły 7.27, 7.28 i 7.29 należało sprowadzić do równań liniowych zapisanych w postaci :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (7.30)$$

W tym celu równania 7.27, 7.28 i 7.29 obustronnie logarytmowano:

a) dla pierścieni ze szczelinami wąskimi NB1:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ} \right)^{b_2} \Big| \ln \quad (7.31)$$

b) pierścienie ze szczelinami szerokimi NB2:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \Big| \ln \quad (7.32)$$

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

$$i - 1 = b \cdot x^{b_1} \cdot s_p^{b_2} \cdot h^{b_3} \Big| \ln \quad (7.33)$$

i po przekształceniu otrzymano następujące postacie równań:

a) dla pierścieni ze szczelinami wąskimi NB1:

$$\ln(i - 1) = \ln(b) + b_1 \ln(x) + b_2 \ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right) \quad (7.34)$$

b) dla pierścieni ze szczelinami szerokimi NB2:

$$\ln(i - 1) = \ln(b) + b_1 \ln(x) \quad (7.35)$$

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

$$\ln(i-1) = \ln(b) + b_1 \ln(x) + b_2 \ln(s_p) + b_3 \ln(h) \quad (7.36)$$

W celu uproszczenia zapisu formuły 7.34, 7.35 i 7.36 wprowadzono następujące oznaczenia:

a) dla pierścieni ze szczelinami wąskimi NB1:

$$y = \ln(i-1);$$

$$b_0 = \ln(b)$$

$$x_1 = \ln(x);$$

$$x_2 = \ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)$$

b) pierścienie ze szczelinami szerokimi NB2:

$$y = \ln(i-1);$$

$$b_0 = \ln(b)$$

$$x_1 = \ln(x);$$

c) dla pierścieni o powierzchni perforowanej NB3 i NB4:

$$y = \ln(i-1);$$

$$b_0 = \ln(b);$$

$$x_1 = \ln(x);$$

$$x_2 = \ln(sp)$$

$$x_3 = \ln(h)$$

Zarówno dla pierścieni nawiewnych ze szczelinami jak perforowanych zmienne x_1 , x_2 , i x_3 są zmiennymi niezależnymi. Zmienna y jest zmienną zależną od tych współczynników.

W celu obliczenia współczynników b , b_1 , b_2 i b_3 zastosowano metodę wielokrotnej regresji liniowej udostępnioną przez program z pakietu Microsoft Office – EXCEL 2002 z dodatkiem do obliczeń statystycznych Analysis ToolPack. Program ten pozwala na opracowywanie zbiorów danych przy pomocy różnych metod statystycznych, a m.in. regresji liniowej wielokrotnej.

Poniżej przedstawiono jedynie wyniki analizy, które dały umożliwiły matematyczny opis zjawiska mieszania strugi nawiewnej pierścieniowej i powietrza z pomieszczenia. Wszystkie obliczenia wykonywano dla przedziału ufności $\alpha = 0,05$ [17]. Czynniki nieistotne eliminowano na podstawie weryfikacji hipotezy zerowej $H_0: b_i = 0$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: b_i \neq 0$. Dla każdego współczynnika regresji b_i postawiono hipotezę zerową $H_0: b_i = 0$. Na podstawie wzoru 7.12 obliczano wartości statystyk t .

Uzyskane wartości t porównywano z wartościami krytycznymi t_α odczytywanymi z tablic matematycznych. W tabeli 7.3 zestawiono wartości t oraz odchylenia standardowe dla poszczególnych współczynników b , b_1 , b_2 i b_3 . W tabeli 7.1 zestawiono wszystkie wartości testu T-Studenta oraz odchylenia standardowe dla współczynników b . W sytuacji, gdy przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, iż współczynniki te są nieistotne, wówczas w tabeli oznaczono je krzyżykami.

Tabela 7.3 Zestawienie wartości statystyk t oraz odchyłeń standartowych dla pierścieni nawiewnych.

Pierścień nawiewny	Współczynniki regresji							
	b		b ₁		b ₂		b ₃	
	S _b	t Stat	S _{b1}	t Stat	S _{b2}	t Stat	S _{b3}	t Stat
NB1	0,047	46,22	0,020	17,44	0,096	-2,96	x	x
NB2	0,025	80,3	0,017	17,4	x	x	x	x
NB3 i NB4	0,72	-1,64	0,03	7,05	0,14	7,25	0,25	-3,03

Do analizy istotności współczynników korelacji wykorzystano test F (Fishera – Snedecora). Wartość tego testu obliczono na podstawie zależności opisanej zależnością 7.13

W tabeli 7.4. przedstawiono współczynniki korelacji oraz regresji dla poszczególnych pierścieni nawiewnych.

Tabela 7.4. Zestawienie współczynników regresji i korelacji oraz wartości testu F dla pierścieni nawiewnych.

Pierścień nawiewny	Współczynniki regresji				Wsp. korelacji	Test Fischera
	b	b_1	b_2	b_3	R	F
NB1	2,198	0,352	-0,284	x	0,86	165
NB2	1,985	0,295	x	x	0,85	302
NB3 i NB4	-1,186	0,216	-1,012	-0,759	0,70	36

W tabeli tej przez „x” oznaczono współczynniki przy zmiennych nieistotnych.

7.2.3 Formuły obliczeniowe współczynników zmieszania

Po przekształceniu wzorów oraz podstawieniu odpowiednich współczynników regresji uzyskano następujące wzory empiryczne opisujące zależności pomiędzy zmiennymi zależnymi i niezależnymi poszczególnymi wielkościami. Wzory poniższe mogą być stosowane do obliczania stopni zmieszania w odległości od nawiewnika oraz innych zmiennych istotnych.

a) dla pierścieni ze szczelinami wąskimi NB1:

$$i - 1 = \frac{9,007 \cdot x^{0,352}}{\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{0,283}} \quad (7.37)$$

b) dla pierścieni ze szczelinami szerokimi NB2:

$$i - 1 = 7,276 \cdot x^{0,295} \quad (7.38)$$

c) Dla pierścieni o perforowanej powierzchni nawiewnej NB3 i NB4:

$$i - 1 = \frac{0,305 \cdot x^{0,2162}}{(sp)^{1,012} \cdot h^{0,759}} \quad (7.39)$$

Wszystkie wzory 7.37÷7.39 zostały określone na podstawie pomiarów prędkości powietrza i obliczeń strumieni powietrza przepływającego w pomieszczeniu w zakresie strumieni powietrza nawiewanego V_N :

$$250\text{m}^3/\text{h} \geq V_n \leq 600\text{m}^3/\text{h}.$$

Zatem mogą być stosowane dla następujących zakresów zmienności parametrów:

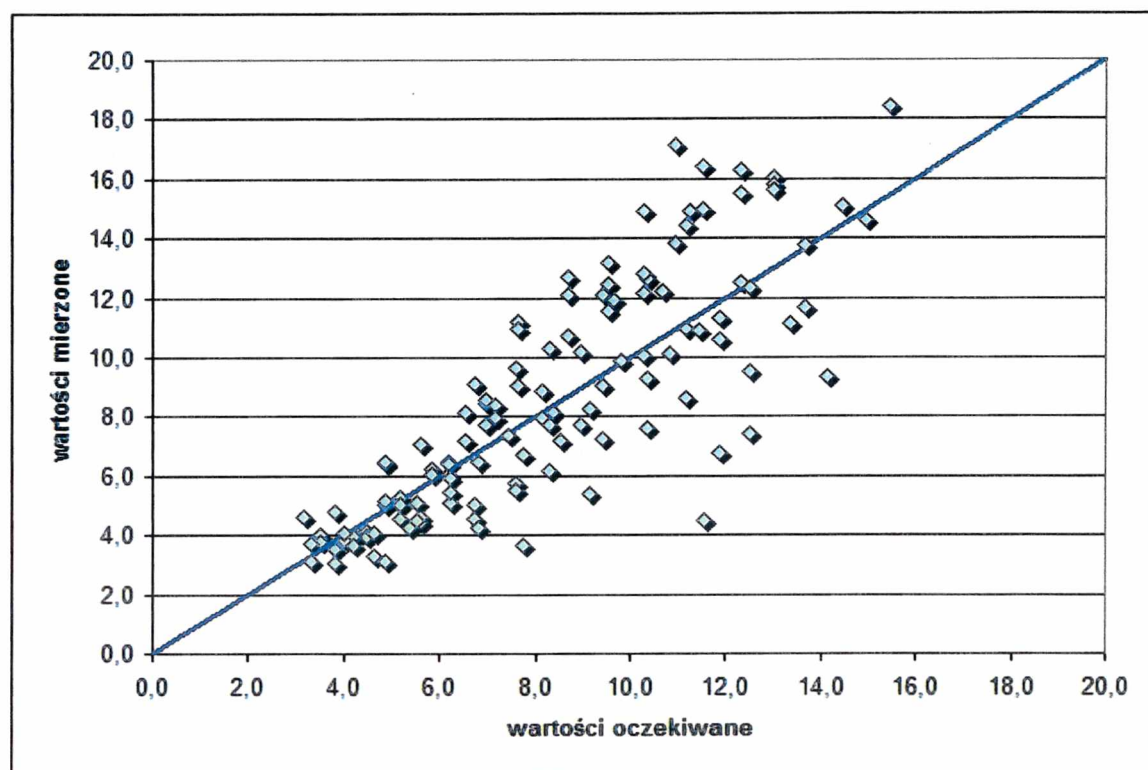
a) pierścienie nawiewne ze szczelinami:

Wielkość	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
V_{netto}	1,44 m/s	6,90 m/s
x	0,05 m	3,00 m
S_p	27%	55%
h	0,07	
$\frac{\alpha}{90^\circ}$	0,67	1

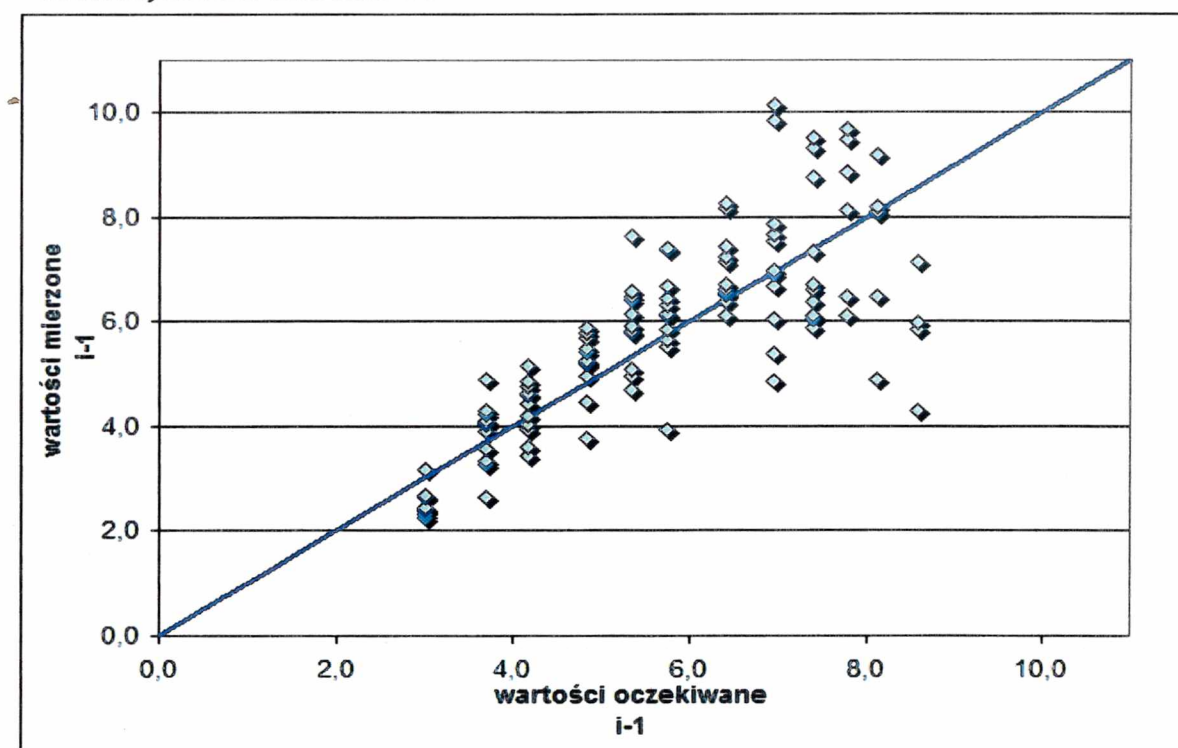
b) pierścienie o płaszczyźnie perforowanej:

	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
V_{netto}	1,11 m/s	5,02m/s
x	0,05 m	3,00 m
S_p	47%	71%
h	0,04	0,07

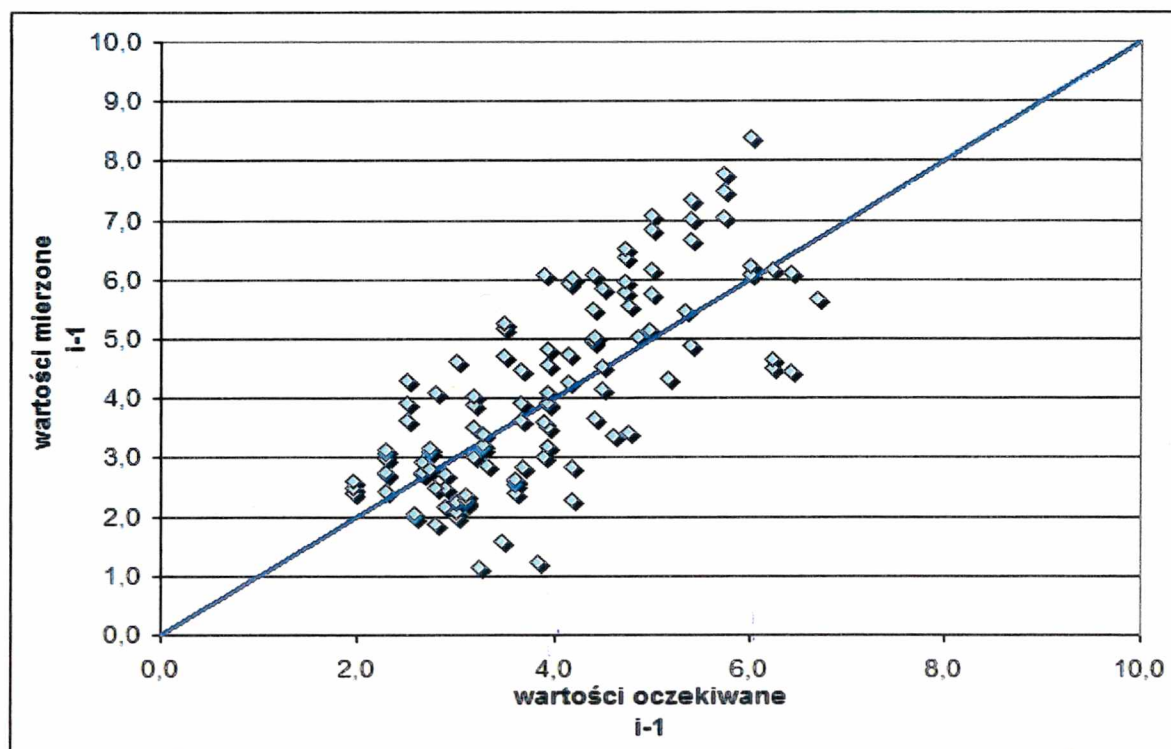
7.2.4. Graficzne zobrazowanie wyników analizy statystycznej



Rys. 7.6. Wykres korelacyjny dla stopni zmieszania dla pierścieni z wąskimi szczelinami nawiewnymi NB1. Zależność 7.37



Rys. 7.7. Wykres korelacyjny dla stopni zmieszania dla pierścieni z szerokimi szczelinami nawiewnymi NB2. Zależność 7.38



Rys.7.8. Wykres korelacyjny dla stopni zmieszania dla pierścieni z płaszczyznami perforowanymi NB3 i NB4. Zależność 7.39

8. ANALIZA DOKŁADNOŚCI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I OBLICZEŃ

8.1. Metoda wyznaczania błędów

Każda wielkość fizyczna określona w wyniku pomiaru obarczona jest błędem pomiarowym. Wyniki pomiarów wyznaczają przedział, w którym z dużym prawdopodobieństwem zawarta jest prawdziwa wartość wielkości mierzonej [22]. Nawet najbardziej doskonałe metody i przyrządy pomiarowe obciążone są błędami. Błędy te dzieli się na *systematyczne* (wynikające z niedokładności użytych w doświadczeniu przyrządów pomiarowych, błędów przyjętej metody pomiarowej), *przypadkowe* (są spowodowane m.in. przez błąd paralaksy, wadę wzroku, niedostateczne wykształcenie obserwatora) oraz *grube* (wynikające z przeoczenia obserwatora lub wpływu zmiennych, których nie rozpatrywano w zjawisku).

Wstępna analiza przeprowadzonych badań pozwoliła wyeliminować błędy grube (przeoczenia) oraz pozwoliła założyć, że błędy systematyczne (wynikające z niedokładności użytych w doświadczeniu przyrządów pomiarowych) są na tyle nieznaczne w stosunku do błędów przypadkowych, iż można je pominąć.

8.2. Błędy przypadkowe

Oszacowanie dokładności wykonanych pomiarów przeprowadzono na podstawie błędów będących wynikiem niedokładności wykorzystywanych przyrządów pomiarowych.

Błąd bezwzględny wartości mierzonej δx_i określany różnicą pomiędzy wartością zmierzoną x_i a wartością prawdziwą x_0 [22] wzór 8.1, przyjęto na poziomie działki elementarnej przyrządu pomiarowego.

$$\delta x_i = x_i - x_0 \quad (8.1)$$

Natomiast błąd względny, określony w procentach, obliczono na podstawie

wzoru 8.2 :

$$\delta_i^w = \frac{x_i - x_0}{x_0} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

Z uwagi na znaczną liczbę pomiarów powtarzanych w warunkach ustalonych, w każdym punkcie pomiarowym dla określenia wartości mierzonej w danym punkcie pomiarowym wyznaczono średnią arytmetyczną z serii pomiarowej wykonanej w tym punkcie. Przyjęto zgodnie z [17] iż z punktu widzenia fizycznego, taka średnia jest najbardziej rozsądna. Wartość średnią serii pomiarowej obliczono na podstawie wzoru:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.3)$$

gdzie:

n – liczba pomiarów,

Średni błąd kwadratowy wartości niezależnych od siebie n pomiarów prostych o wartości x_i i wartości średniej $\bar{x}$ (zwany odchyleniem standardowym $\sigma(x)$), wyznaczono ze wzoru [17]:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (8.4)$$

Średni błąd kwadratowy wartości średniej $\bar{x}$ z n poszczególnych pomiarów x_i , o jednakowej dokładności, określający miarę dokładności wartości średnich arytmetycznych $\bar{x}$ w serii pomiarowych, obliczano na podstawie zależności [22,17]:

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (8.5)$$

Zganie z [17] przyjęto, że prawie na pewno prawdziwa wartość x zawiera się w granicach $\bar{x} - 3s(x)$ i $\bar{x} + 3s(x)$. Zatem ostatecznie wartość mierzona α wynosi:

$$\alpha = \bar{x} \pm 3s(x) \quad (8.6)$$

W przypadku pomiarów wielkości złożonych, określonych iloczynem o postaci :

$$z = A_1 \cdot x_1^{a_1} \cdot A_2 \cdot x_2^{a_2} \cdot A_k \cdot x_k^{a_k} \quad (8.7)$$

określano względny błąd kwadratowy średni wartości $\bar{z}$ na podstawie wzoru [17]:

$$\frac{\sigma(z)}{\bar{z}} = \sqrt{\sum_{k=1}^l \left(a_k \frac{s(\bar{x}_k)}{\bar{x}_k} \right)^2} \quad (8.8)$$

8.3. Błędy wielkości mierzonych

Na stanowisku pomiarowym przeprowadzano pomiary:

- temperatury powietrza nawiewanego oraz powietrza w pomieszczeniu,
- prędkości powietrza nawiewanego oraz prędkości powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych,
- strat ciśnienia na kryzie pomiarowej, na podstawie których dokonywano określenia objętości strumienia powietrza nawiewanego i wywiewanego.

W tabeli 8.2 przedstawiono zakresy pomiarowe, dokładność pomiaru, wartości średnie oraz bezwzględne błędy pomiarów prostych dla stosowanych na stanowisku przyrządów pomiarowych.

Tabela 8.1. Błędy proste – wielkości mierzonych

<i>L.p.</i>	<i>Wielkość mierzona</i>	<i>Przyrząd pomiarowy</i>	<i>Zakres pomiarowy</i>	<i>Wartość średnia</i>	<i>Bezwzględny błąd pomiaru</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Pomiary temperatur					
1	Pomiar temperatury powietrza nawiewanego	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷(+50) °C	$t_{nśr} = 22,12 \text{ °C}$	$\pm 0,2 \text{ °C}$
2	Pomiar temperatury	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy	0÷(+50) °C	$t_{wśr} = 22,46 \text{ °C}$	$\pm 0,2 \text{ °C}$

	powietrza wywiewanego	testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową			
3	Pomiar temperatury powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych - nawiew	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷(+50) °C	22,23 °C	±0,2% °C
4	Pomiar temperatury powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych – wywiew	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷(+50) °C	22,56 °C	±0,2% °C
Pomiary prędkości powietrza					
5	Pomiar prędkości powietrza nawiewanego	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷10 m/s	4,12 m/s	±0,01 m/s
6	Pomiar prędkości powietrza wywiewanego	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷10 m/s	2,38 m/s	±0,01 m/s
7	Pomiar prędkości powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych - nawiew	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷10 m/s	0,34 m/s	±0,01 m/s
8	Pomiar prędkości powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych - wywiew	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z dwufunkcyjną dokładną sondą pomiarową	0÷10 m/s	1,22 m/s	±0,01 m/s
Pomiary ciśnienia różnicowego na kryzie pomiarowej					
9	Pomiar ciśnienia różnicowego na nawiewnej kryzie pomiarowej	wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z sondą do pomiaru ciśnienia	0÷2 hPa	154 Pa	±0,01 hPa

10	Pomiar ciśnienia różnicowego na wywiewnej kryzie pomiarowej	różnicowego wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy testo400 z sondą do pomiaru ciśnienia różnicowego	0÷2 hPa	200 Pa	±0,01 hPa
Odległość między punktami pomiarowymi					
11	Odległość w siatce pomiarowej	Miara elementarna	0÷1000 m	0,1 m	±0,001 m

Tabela 8.2. Błędy wielkości złożonych

Lp.	Wielkość złożona	Formuła obliczeniowa	średni błąd kwadratowy		
			bezwzględny		względny
			wartość	jednostka	%
1	2	3	4	5	6
1	Strumień powietrza nawiewanego V_n	Zgodnie z PN-ISO 5221	3,08	m ³ /h	0,73
2	Strumień powietrza nawiewanego V_w	Zgodnie z PN-ISO 5221	3,61	m ³ /h	0,86
3	Powierzchnia wypływu netto	$F_{netto} = n \cdot a \cdot h$	0,0005	m ²	2,18
3	maksymalna prędkość względna	$v_w^{max} = \frac{v_{max}}{v_{netto}}$	0,0360	/	6,55
4	Prędkość wypływu w otworze netto	$v_{netto} = \frac{V_n}{F_{netto}}$	0,039	m/s	1,25
7	Maksymalna prędkość strugi w strefie przejściowej dla pierścieni: a) z wąskimi szczelinami b) z wąskimi szczelinami bez $\alpha=45^\circ$, c) z szerokimi szczelinami d) ze szczelinami e) o powierzchni perforowanej	a) $v_{max} = \frac{0,137 \cdot v_{netto}}{x^{0,613}}$ b) $v_{max} = \frac{0,114 \cdot v_{netto}}{x^{0,603} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{1,079}}$ c) $v_{max} = \frac{0,213 \cdot v_{netto}}{x^{0,637}}$ d) $v_{max} = \frac{0,341 \cdot v_{netto} \cdot s_p^{0,713}}{x^{0,609}}$ e) $v_{max} = \frac{0,417 \cdot v_{netto} \cdot s_p^{1,1}}{x^{0,487}}$	0,074	m/s	Max. wartość błędu 6,78
8	Maksymalna prędkość strugi w strefie przejściowej	a)	0,013	m/s	Max. wartość błędu

	dla pierścieni: f) z wąskimi szczelinami g) z wąskimi szczelinami bez $\alpha=45^\circ$, h) z szerokimi szczelinami i) ze szczelinami o powierzchni perforowanej	$v_{\max} = \frac{0,091 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,008}}$ b) $v_{\max} = \frac{0,057 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,15} \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{1,90}}$ c) $v_{\max} = \frac{1,128 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,174}}$ d) $v_{\max} = \frac{1,81 \cdot v_{\text{netto}} \cdot s_p^{0,54}}{x^{1,089}}$ e) $v_{\max} = \frac{0,064 \cdot v_{\text{netto}}}{x^{1,308}}$			6,63
9	Stopień zmieszania	a) $i-1 = \frac{9,007 x^{0,352}}{\left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0,283}}$ b) $i-1 = 7,276 x^{0,295}$ c) $i-1 = \frac{0,305 x^{0,216}}{(sp)^{1,012} h^{0,755}}$	0,043	m^3/m^3 pow. transportowanego	Max. wartość błędu 0,86

9. PODSUMOWANIE

1. Na podstawie danych z literatury oraz dostępnych wytycznych projektowania i eksploatacji wentylacji/klimatyzacji pomieszczeń handlowych i usługowych sieci supermarketów, określono wymagane warunki mikroklimatu. Zwrócono uwagę na często indywidualne wymagania dotyczące parametrów powietrza w omawianych pomieszczeniach.
2. Przedstawiono schematy urządzeń wentylacyjnych/klimatyzacyjnych stosowanych do uzdatniania powietrza nawiewanego i kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach. Zaprezentowano urządzenia o różnych konfiguracjach zarówno sekcji uzdatniania powietrza jak również struktury instalacji powietrznych oraz układów sterowania i regulacji.
3. Omówiono zasadnicze układy organizacji wymiany powietrza stosowane w pomieszczeniach handlowych i usługowych. Szczególną uwagę zwrócono na organizację wymiany powietrza w niewysokich pomieszczeniach handlowych o znacznych zyskach ciepła, w których elementy nawiewne i wywiewne korzystnie jest instalować w części podstropowej lub w przestrzeniach międzystropowych.
4. Zaprojektowano zintegrowane elementy nawiewno-wywiewne z radialnym wpływem powietrza oraz przeprowadzono ich badania.
5. Badania dotyczyły 14 elementów nawiewno-wywiewnych różniących się pierścieniowymi powierzchniami nawiewnymi.
6. Przeprowadzono pomiary prędkości powietrza w strugach nawiewnych w funkcji odległości od powierzchni jak i odległości od osi wypływu strugi nawiewnej.
7. Na podstawie pomiarów w strugach wypływających z omawianych nawiewników wyróżniono **dwie** charakterystyczne strefy zmiany prędkości powietrza: strefę **prześciową** oraz strefę **główną** – najważniejszą dla wentylacji i klimatyzacji.
8. Wyprowadzono uogólnione formuły opisujące maksymalne prędkości powietrza w strudze dla obu stref w funkcji odległości od nawiewnika oraz w zależności od rodzaju uzbrojenia pierścienia.

Na podstawie badań stwierdzono, że maksymalne prędkości powietrza w strugach nawiewnych wachlarzowych wypływających z uzbrojonych nawiewników pierścieniowych zależą głównie od:

- prędkości w otworze netto;

- odległości od powierzchni nawiewnej;
 - stopnia otwarcia otworu nawiewnego;
 - struktury powierzchni nawiewnej.
9. Wyprowadzono formuły dla obliczania stopni zmieszania powietrza nawiewanego i z pomieszczenia, które zależą od:
- odległości od nawiewnika;
 - stopnia otwarcia;
 - wysokości pierścienia nawiewnego;
 - struktury powierzchni nawiewnej.
10. Otrzymane zależności pozwalają na dokładną ocenę działania pierścieniowych elementów nawiewnych.
11. Wyniki badań oraz formuły obliczeniowe mogą być przydatne zarówno dla projektantów wentylacji jak i konstruktorów nawiewników. Pozwalają na analizę prędkości i stopni zmieszania powietrza zawiewanego i z pomieszczenia, zarówno w strefie przejściowej jak i głównej, przy różnych parametrach pracy nawiewników.
12. W dostępnej literaturze nie znaleziono formuł opisujących strugi powietrza w wpływające z nawiewników pierścieniowych bez strefy stabilizującej. Wyprowadzone formuły w pewnym zakresie wypełniają tę lukę.

10. PIŚMIENNICTWO

- [1] Awbi H.B. *„Ventilation of Buildings”*, E&FN SPON, Londyn 1991.
- [2] Bąk J. *„Uprozczone obliczanie oświetlenia ogólnego wewnątrz”*, Wydawnictwa naukowo-techniczne, Warszawa 1974.
- [3] Besler G. J.: *„Mikroklimat, jonizacja a energooszczędność”*, referat na XIII Ogólnopolską Konferencję Naukowo – Techniczną „Wentylacja i Termoenergetyka w Budownictwie Ogólnym”, Zakopane – Kościelisko, 27-28 maja 1999 r.
- [4] Besler G. J.: *„Problemy kształtowania zdrowego mikroklimatu w budynkach”*, referat na XIII Ogólnopolską Konferencję Naukowo – Techniczną „Wentylacja i Termoenergetyka w Budownictwie Ogólnym”, Zakopane – Kościelisko, 27-28 maja 1999 r.
- [5] Borysiewicz A., Caliński St., Okulicz – Kozaryn L.: *„Instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne. Projektowanie układów”*, Arkady, Warszawa 1975.
- [6] Chlipalski T. z zespołem, *„Badania parametrów mikroklimatu w wybranych domach towarowych w Polsce”* Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej, Gliwice 1980.
- [7] Chlipalski T. z zespołem, *„Kształtowanie mikroklimatu w salach sprzedaży obiektów handlowych”* Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej, Gliwice 1980.
- [8] Chlipalski T. z zespołem, *„Kształtowanie struktury cieplnej obiektów handlowych w aspekcie wentylacji i klimatyzacji. Prace naukowo-badawcze”* Katedra Ogrzewnictwa i wentylacji POL. Śl., Gliwice 1977-80.
- [9] Chlipalski T. z zespołem, *„Metoda projektowania instalacji do kształtowania mikroklimatu sal sprzedaży spółdzielczych Domów Towarowych”*, Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej, Gliwice 1978.
- [10] Chlipalski T., Majerski St., *„Mikroklimat w obiektach handlowych”*, Aktualne zagadnienia klimatyzacji, Międzygórze, 28-30 IX 1977, Materiały Konferencyjne, Wrocław 1977
- [11] Chlipalski T., Majerski St., Wąsacz M., *„Porównanie w aspekcie energetycznym wybranych układów wentylacji w obiektach handlowych”*, , Badania systemów w

- ogrzewnictwie wentylacji, klimatyzacji i ciepłownictwie, Wrocław –Szkłarska
Poręba, 22-26 kwietnia 1986, Materiały Konferencyjne, Wrocław 1977
- [12] Fanger P.O., *„Komfort cieplny”*, Arkady 1974r.
- [13] Faryna-Paszkiewicz H., *„Przedwojenne sklepy”*, Architektura 2/1996.
- [14] Ferencowicz J., *„Wentylacja i klimatyzacja”*, Arkady 1964, Wydanie 2
- [15] Gaziński B., *„Poradnik Klimatyzacja”*, Systherm Serwis, Poznań 2001.
- [16] Gutkowski K., *„Chłodnictwo i klimatyzacja”*, Wydawnictwa Naukowo –
Techniczne, Warszawa 2003.
- [17] Hasnel H.(tłum. Doc. dr Krajewski B), *„Podstawy rachunku błędów”*
Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968.
- [18] Jones W.P., *„Klimatyzacja”* Arkady, Warszawa 2001, Wydanie polskie 2.
- [19] Kacperski J., *„Opracowanie danych pomiarowych”*, Wydawnictwo Uniwersytetu
Łódzkiego, Łódź 1997.
- [20] Katalogi firm: FLAKT BOVENT, HALTON, KRANTZ, SCHAKO, STIFAB
FAREX, TROX.
- [21] Kempa E., praca zbiorowa, *„Podstawy ochrony środowiska”*, Wydawnictwo
Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976.
- [22] Kolodziejczyk L., Rubik M., Mańkowski S., *„Pomiary w inżynierii sanitarnej”*,
Arkady, Warszawa 1974.
- [23] Koronacki J., Mielniczuk J., *„Statystyka”*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne,
Warszawa 2001.
- [24] Kuratow T., *„Pomiary przepływów cieczy, par i gazów”*, Wydawnictwo „Śląsk”,
Katowice 1977.
- [25] Lampe G., Pfail A., Schmittlutz R., Tokarz M., *„Projekt klimatyzacji a projekt
budynku”*, Arkady 1981.
- [26] Lipska B., Nawrocki W., *„Podstawy projektowania wentylacji – przykłady”*,
Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997. 15
- [27] Lissowska A., *„Analiza czasu zakupu w sklepach samoobsługowych”*, Biblioteka
Instytutu Handlu Wewnętrznego, Warszawa 1972.
- [28] Majerska –Palubicka B.: *„Rozwiązania energooszczędne w architektonicznym
projektowaniu obiektów handlowych.”*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej,
Gliwice 2001.

- [29] Makowiecki J., *Ekonomiczne systemy wentylacyjne*”, Chłodnictwo & Klimatyzacja 3/1997.
- [30] Malicki M., „*Wentylacja i klimatyzacja*”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
- [31] Malicki M., „*Wentylacja i klimatyzacja*”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1965.
- [32] Middleton M.R., „*EXCEL w analizie danych*”, wydawnictwo RM, Warszawa 2004.
- [33] Nantka M., „*Instalacje grzewcze i wentylacyjne w budownictwie, część I, Budynki i ich potrzeby grzewcze i wentylacyjne*”, Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [34] Opaliński S., „*Systemy wentylacji pomieszczeń sklepowych*”, COW
- [35] P.O. Fanger, Z. Popiołek, P. Wargoeki, „*Środowisko wewnętrzne. Wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy*”, Politechnika Śląska, Gliwice 2003
- [36] Pawilójc A., Targański., Bonca Z., „*Odzysk ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych*”, Wydawnictwo Masta, Gdański 1998.
- [37] Peck P., „*Ochrona przeciwsłoneczna z wentylacją*”, Świat szkła 6/97.
- [38] Pelech A., „*Bilans ciepła w pomieszczeniu i obliczanie strumienia powietrza wentylującego*”, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1994.
- [39] Pelech A., „*Wentylacja i klimatyzacja podstawy*”- skrypt niepublikowany.
- [40] PN-76/B-03420: „*Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego*”.
- [41] PN-78/B-03421: „*Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach do stałego przebywania ludzi*”.
- [42] PN-82/B-02402: „*Ogrzewnictwo. Temperatuty ogrzewanych pomieszczeń w budynkach*”.
- [43] PN-82/B-02403: „*Ogrzewnictwo. Temperatuty obliczeniowe zewnętrzne*”.
- [44] PN-83/B-03430/Az3:2000: „*Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania*”.
- [45] PN-87/B-02151/02: „*Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach*”.
- [46] PN-B-03405: „*Obliczanie zapotrzebowania na ciepło w pomieszczeniach o kubaturze ponad 600m³*”.

- [47] PN-B-03406: „Obliczanie zapotrzebowania na ciepło w pomieszczeniach o kubaturze do 600m³”.
- [48] PN-ISO5221 grudzień 1994: „Rozprowadzenie i rozdział powietrza. Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie”.
- [49] Polański Z., „Współczesne metody badań doświadczalnych” Wiedza Powszechna, Warszawa 1978.
- [50] Przydróżny E., Szczęśniak S, Sompoliński M., „Urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne z nagrzewnicami strefowymi o stałych i zmiennych przepływach powietrza. Część 1”, Chłodnictwo i Klimatyzacja, , nr 5/2003
- [51] Przydróżny E., Szczęśniak S, Sompoliński M., „Urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne z nagrzewnicami strefowymi o stałych i zmiennych przepływach powietrza. Część 2”, Chłodnictwo i Klimatyzacja, , nr 6/2003
- [52] Przydróżny E., Szczęśniak S., „Urządzenia dwuprzewodowe z regulacją pośrednią i bezpośrednią”, Materiały konferencyjne, Wentylacja, Klimatyzacja i energetyka cieplna w budownictwie ogólnym, Zakopane-Kościelisko, 9-11 X 2002.
- [53] Przydróżny E., Szczęśniak S., „Systemy kształtowanie mikroklimatu obiektach handlowych i usługowych”, Instal 1/2003.
- [54] Przydróżny E., Szczęśniak S., „Systemy wentylacji i klimatyzacji z nagrzewnicami strefowymi”, X International Conference Air Conditioning Protection & District Heating, Szklarska Poręba 2002.
- [55] Przydróżny St. „Wentylacja” Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.
- [56] Przydróżny St., Ferencowicz J. „Klimatyzacja” Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.
- [57] Przydróżny St., Przydróżny E., „Wpływ oświetlenia na ilość powietrza wentylacyjnego”, COW, Nr 1/1976.
- [58] Recknagel, Sprenger, Honman, Schramek, “Ogrzewanie i Klimatyzacja „Poradnik EWFE – Wydanie 1, Gdańsk 1994.
- [59] Rumszyski L.Z., „Matematyczne Opracowanie Wyników Eksperymentu”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [60] Strzałkowski A., Śliżyński A., „Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1973.

- [61] Szymański T., Wasiluk W., *„Systemy wentylacji przemysłowej”*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
- [62] Szymański T., Wasiluk W., *„Wentylacja użytkowa poradnik”*, Wydawnictwo Masta, Gdańsk 1999.
- [63] Śliwowski L., *„Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [64] Udostępnione przez projektantów wytyczne dla projektowania wentylacji i klimatyzacji sieci handlowych.
- [65] Wąsacz M., *„Możliwości ograniczenia zużycia energii chłodniczej do klimatyzacji domów handlowych”*, COW Nr 10/1980.
- [66] Wąsacz M. *„Możliwości ograniczenia zużycia energii chłodniczej do klimatyzacji domów handlowych”*, COW nr 10/1980.
- [67] Werszko D., *„Pomiary podstawowych znamion termodynamicznych”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1973.
- [68] Wright E. praca zbiorowa, *„Historia świata. Średniowiecze. Renesans”*, Agencja Informacyjna S.A., Warszawa 1993.
- [69] Zin W. praca zbiorowa, *„Zabytki urbanistyki i architektury w Polsce. Odbudowa i konserwacja”*, Arkady, Warszawa 1986.