POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej



ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Jana Tabernackiego

pt. „Badania nad efektywnością działania urządzeń do aeracji ścieków z dyfuzorami tkaninowymi i mieszalnikami siatkowymi"

WARSZAWA
1978


POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
EX LIBRIS
BIBLIOTEKI GŁÓWNEJ
R. 2 804

628.33:043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII SANITARNEJ I WODNEJ
INSTYTUT ZAOPATRZENIA W WODE I BUDOWNICTWA WODNEGO

JAN TABERNACKI

BADANIA NAD EFEKTYWNOSCIA DZIAŁANIA URZADZEN DO AERACJI SCIEKOW Z DYFUZORAMI TKANINOWYMI I MIESZALNIKAMI SIATKOWYMI

Rozprawa doktorska

Promotor:
doc.dr inż. Marek ROMAN

WARSZAWA 1978

R. 2804
Biblioteka Główna

221-1-1978-D

S P I S T R E Ś C I

Str.

1. Przedmiot, cel i zakres pracy 1
2. Teoretyczne podstawy operacji natleniania 2
   2.1. Ogólne teoretyczne podstawy operacji natleniania 2
   2.2. Teoretyczne podstawy operacji natleniania pęcherzykami sprężonego powietrza 9
3. Przegląd urządzeń stosowanych do rozdziału sprężonego powietrza w komorach osadu czynnego ... 17
4. Koncepcja technologiczno-konstrukcyjna dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych 22
   4.1. Uzasadnienie podjęcia badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych 22
   4.2. Aktualny stan badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych 26
   4.3. Teoretyczne przesłanki działania i konstrukcji mieszalników siatkowych 29
   4.4. Opis proponowanych nowych konstrukcji urządzeń do napowietrzania 33
5. Sformułowanie zagadnień wymagających badań 35
6. Metodyka i zakres badań 36
   6.1. Ogólny opis zastosowanej metodyki 36
   6.2. Opis urządzeń doświadczalnych 37
   6.3. Sposób realizacji pomiarów i ich zakres 41
7. Wyniki badań i ich interpretacja 44
   7.1. Opis obserwacji optycznych 44

Str.

7.2. Wyniki badań nad oporami przy przepływie sprężonego powietrza przez materiał porowaty i ich interpretacja 48
7.3. Wyniki badań nad efektywnością natleniania i ich interpretacja 48
7.4. Wskaźniki energetycznej efektywności operacji natleniania dyfuzorami i mieszalnikami siatkowymi 51
8. Analiza wyników, porównanie badanych układów i wnioski z badań 55
8.1. Analiza wyników badań nad dyfuzorami tkaninowymi 55
8.2. Analiza wyników badań nad mieszalnikami siatkowymi 58
8.3. Porównanie badanych układów 61
8.4. Wnioski z badań 64
9. Kierunki dalszych prac nad dyfuzorami tkaninowymi i mieszalnikami siatkowymi 68
10. Podsumowanie i wnioski końcowe 69

Piśmiennictwo
Tablice ze spisem
Rysunki ze spisem

1. Przedmiot, cel i zakres pracy

P r z e d m i o t e m p r a c y jest zbadanie efektywności działania nowych konstrukcji do głębokiego napowietrzania ścieków w komorach osadu czynnego.

C e l e m p r a c y jest ustalenie charakterystyk technologicznych i ekonomicznych dla nowych, nie stosowanych dotychczas w kraju, urządzeń do aeracji ścieków. Wzięto przy tym pod uwagę dwa typy urządzeń będące przedmiotem zastrzeżeń patentowych, a mianowicie aerator z dyfuzorem tkaninowym i aerator ze statycznym mieszalnikiem siatkowym.

Dla zrealizowania głównego celu rozprawy niezbędne było objęcie jej z a k r e s e m następujących zagadnień cząstkowych:

- opracowanie i wykonanie doświadczalnych konstrukcji urządzeń do aeracji ścieków /aerator z dyfuzorem tkaninowym i aerator z mieszalnikiem siatkowym/ oraz opracowanie projektu i wykonanie ułamkowo-technicznego stanowiska badawczego
- zbadanie wpływu różnych czynników na charakterystykę hydrauliczną aeratorów
- zbadanie wpływu różnych czynników na efektywność natleniania cieczy omawianymi aeratorami
- dokonanie analizy wpływu różnych czynników na ekonomiczną efektywność działania badanych aeratorów.

Badania aeratorów będących przedmiotem niniejszej pracy przeprowadzono dla zunifikowanych warunków testowych przy użyciu czystej wody, tak ażeby uzyskane wyniki można było porównywać z charakterystyką innych aeratorów zagranicznych czy krajowych, ustaloną w ten sam sposób.

Właścicielem zastrzeżeń patentowych urządzeń stanowiących przedmiot niniejszej pracy jest Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, zaś współautorem tych patentów - autor niniejszej pracy.

2. Teoretyczne podstawy operacji natleniania

2.1. Ogólne teoretyczne podstawy operacji natleniania

Operacja natleniania, w jej zastosowaniu do biologicznego oczyszczania ścieków, może być traktowana dwojako:

- jako zjawisko absorbcji tj. pochłaniania gazu przez ciecz
- jako zjawisko hydrodynamiczne tj. mieszania cieczy.

Warunkiem koniecznym zachodzenia pierwszego z tych zjawisk jest rozpuszczalność gazu w cieczy. W wypadku operacji natleniania poważnym problemem jest niewielka rozpuszczalność tlenu w wodzie i ściekach.

Proces absorbcji można rozpatrywać:

- statycznie tj. analizować jak przedstawia się stan równowagi faz
- kinetycznie tj. jaka jest szybkość procesu w danych warunkach, ewentualnie - jakie warunki powinny być stworzone aby proces był technicznie opłacalny.

Przy rozpatrywaniu statycznym rozpuszczalność gazów podlega prawu Henry'ego /1803/, które stwierdza, że w stałej temperaturze rozpuszczalność gazów w cieczy jest wprost proporcjonalna do ciśnienia cząstkowego gazów nad roztworem /bez względu na ciśnienie całkowite/:

$$C = H \cdot p \quad \text{przy } T = \text{const} \qquad 2\text{-}1$$

gdzie:

C - stężenie gazu w cieczy; kg/m^3

p - ciśnienie cząstkowe gazu N/m^2

H - stała Henry'ego; kg/Nm

Prawo to, jak już, wspomniano dotyczy warunków statycznych i z tego powodu nie może być stosowane bezpośrednio w operacji natleniania. W kinetycznym ujęciu absorbcji występują dwa rodzaje ruchu masy [1] :

- dyfuzja
- wnikanie masy.

Dyfuzja czysta jest zjawiskiem molekularnym i przebiega w warstwach nieruchomych lub w zakresie przepływów laminarnych czynników biorących udział w dyfuzji. Dyfuzja może przebiegać jako zjawisko ustalone lub nieustalone. W pierwszym wypadku stężenie składnika wymienianego jest w każdym punkcie analizowanej przestrzeni stałe w czasie, w drugim na początku procesu obserwuje się gwałtowne spadki stężeń, potem coraz mniejsze, a na końcu procesu po wyrównaniu się stężeń proces ustaje. Kinetyka dyfuzji czystej może być wyrażona prawem Ficka:

$$\frac{dm}{dt} = D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \qquad 2\text{-}2$$

gdzie:

$\frac{dm}{dt}$ - masowa prędkość absorbcji gazu; kg/s

D - stała dyfuzji charakteryzująca składniki dyfuzji; m^2/s

A - powierzchnia przekroju poprzecznego dyfuzji; m^2

$\frac{dc}{dx}$ - gradient stężenia; kg/m^3m

Wnikanie masy jest procesem złożonym polegającym na transporcie składnika od rdzenia fazy gazowej ku warstwie granicznej przez konwekcję i transporcie masy przez tę warstwę do powierzchni międzyfazowej przez dyfuzję. Proces złożony z wnikania masy w jednej fazie do powierzchni międzyfazowej, a następnie od tejże powierzchni do rdzenia drugiej fazy nosi nazwę przenikania masy [1]. Niewątpliwie w wypadku natleniania występuje ten właśnie proces.

Powierzchnia międzyfazowa układu ciecz - gaz nazywana jest zwierciadłem. Wokół zwierciadła tworzą się dwie warstwy graniczne: w fazie gazowej turbulencja gazu płynącego obok powierzchni cieczy nie dochodzi do samego zwierciadła, lecz napotyka na warstwę poruszającą się laminarnie /tarcie gazu o ciecz/, przez którą składnik musi przedyfundować według praw dyfuzji aby dotrzeć do zwierciadła. Przedstawiony sposób rozumowania zakładający powstanie warstwy granicznej na skutek tarcia czynników o siebie przy zwierciadle nie może być zastosowany w odniesieniu do cieczy. Tarcie cieczy o gaz jest zbyt małe aby wystarczyło na zredukowanie prędkości przy powierzchni cieczy do przepływu uwarstwionego jeżeli rdzeń cieczy płynie burzliwie. Tym nie mniej w literaturze fachowej przyjęto jako pojęcie zastępcze istnienie warstwy granicznej również po stronie cieczy stykającej się z gazem. Pod pojęciem zastępczej warstwy granicznej należy rozumieć taką warstwę, która gdyby istniała, dawałaby opór równoważny oporowi wnikania masy.

Powyższe rozumowanie stało się podstawą jednego z najbardziej znanych modeli procesu absorbcji stworzonemu przez Whitmana [2] i znanemu pod nazwą teorii dwu warstw granicznych. Oprócz przyjęcia zastępczej warstwy granicznej w teorii tej przyjęto jeszcze inne założenia wyjściowe [2]:

- zaniedbuje się opór warstwy granicznej gazowej
- przenikanie gazu przez warstwę graniczną cieczy odbywa się przy jednakowym gradiencie stężenia na całej grubości warstwy międzyfazowej,
- przenikanie masy gazu do rdzenia cieczy odbywa się równomiernie, tak że stężenie gazu w cieczy jest równomierne.

Przy powyższych założeniach określono w teorii dwu warstw granicznych prędkość przenikania gazu do cieczy równaniem powstałym z przekształcenia prawa Ficka:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{D}{L} \cdot A \cdot \left(C_S - C_L\right) = K_L \cdot A \cdot \left(C_S - C_L\right) \qquad 2\text{-}3$$

gdzie:

$\frac{dm}{dt}$ - masowa prędkość absorbcji gazu, kg/s

D - stała dyfuzji, m^2/s

L - grubość warstwy granicznej cieczy, m

A - powierzchnia zwierciadła, m^2

C_S - stężenie gazu w warstwie granicznej, kg/m^3

C_L - stężenie gazu w masie cieczy, na głębokości L, kg/m^3

K_L - współczynnik przenikania gazu przez warstwę graniczną cieczy, m/s.

Dzieląc powyższe równanie stronami przez objętość cieczy V otrzymuje się równanie opisujące prędkość zmiany stężenia rozpuszczonego w cieczy gazu:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} \cdot \left(C_S - C_L\right) \qquad 2\text{-}4$$

Prawa strona tego równania przedstawia chwilową prędkość zmian stężenia w przedziale czasowym. Dla wyznaczenia przebiegu zmian stężenia w czasie należy to równanie scałkować w granicach O do t dla czasu i od C_o do C_L.

Całkowanie równania /2-4/ prowadzi do następującego wzoru:

$$\ln \frac{C_s - C_o}{C_s - C_L} = K_L \cdot \frac{A}{V} \cdot t \qquad 2\text{-}5a$$

lub

$$\log \frac{C_s - C_o}{C_s - C_L} = \frac{1}{2,3} K_L \cdot a \cdot t \qquad 2\text{-}5b$$

gdzie:

C_o - początkowe stężenie tlenu w wodzie kg/m^3

$a - \frac{A}{V}$.

Przedstawione równania uznane są w chwili obecnej za ogólnie słuszne. Dyskusyjną jednak jest wartość współczynnika przenikania gazu K_L, którego określenie jest istotą innych teoretycznych modeli absorbcji. Założenia omówionej teorii dwóch warstw granicznych zostały podważone przez twórców innych modeli absorbcji.

Twórcą innego znanego modelu absorbcji był Higbie [3], który w 1935 roku opublikował teorię znaną pod nazwą teorii penetracji. W teorii tej przyjmuje się, że powierzchnia cieczy składa się z elementów, z których każdy przez pewien czas jest w kontakcie z fazą gazową po czym wnika w głąb fazy ciekłej, zaś jego miejsce zajmuje element przybyły z rdzenia fazy ciekłej. Higbie przyjął, że cała wewnętrzna masa cieczy w warstwie granicznej pozostaje w kontakcie z fazą gazową przez okres t', po czym następuje gwałtowne wymieszanie i całkowita odnowa powierzchni styku obu faz. Cykl ten powtarza się wielokrotnie. Matematyczne ujęcie tego modelu doprowadziło do sformułowania wzoru na współczynnik przenikania gazu K_L:

$$K_L = 1.13\sqrt{\frac{D}{t'}} \qquad 2\text{-}6$$

gdzie:

D - stała dyfuzji, m^2/s

t' - czas „odnowy" zwierciadła, s

Model absorbcji Higbiego, jak i poprzednia teoria, nie odzwierciedla w pełni warunków rzeczywistych, gdyż zakłada się w nim, że proces odnowy warstw następuje na całej powierzchni kontaktu jednocześnie, podczas gdy w rzeczywistości warunki turbulentne powodują, że odnowa ta zachodzi przypadkowo i nie dotyczy całego zwierciadła. Teoria penetracji Higbiego została w 1951 roku zmodyfikowana przez Danckwertsa [4], [5] . Wprowadził on do teorii penetracji pojęcie funkcji stopnia równomierności odnowy zwierciadła zwanej również funkcją rozkładu wiekowego. Oprócz powyższego Danckwerts założył, że turbulencja w masie cieczy jest odpowiednio duża aby przenikanie gazu odbywało się nie na zasadzie dyfuzji lecz mieszania, a także że średnie natężenie absorbcji jest jednakowe na całej powierzchni kontaktu. Postać funkcji rozkładu wiekowego jest funkcją rozkładu wykładniczego. Rozważania Danckwertsa doprowadziły do sformułowania wzoru na współczynnik przenikania gazu w postaci zbliżonej do wzoru Higbiego:

$$K_L = \sqrt{\frac{D}{t^{-1}}} \qquad 2\text{-}7$$

gdzie:

oznaczenia jak we wzorze 2-6

Porównanie wzorów 2-6 i 2-7 prowadzi do wniosku, że wartość współczynnika K_L podana przez Danckwertsa jest mniejsza od wartości podanej przez Higbiego, co wynika z różnic w przyjętych założeniach wyjściowych. Obie teorie zgodnie zakładają, że grubość warstwy granicznej cieczy L nie ma wpływu na prędkość przenikania gazu. Warto wspomnieć, że obaj badacze skorzystali w swoich rozważaniach nie z cytowanego wzoru Ficka, lecz z bardziej ogólnego równania nieustalonego ruchu masy znanego pod nazwą równania Fouriera.

Podejmowane są próby pogodzenia obu teorii i wykazania, że są one granicznymi rozwiązaniami ogólnego opisu zjawiska absorbcji. W 1958 r. Toor i Marchello [6] rozwiązując równanie Fouriera sformułowali dwie postacie wzoru na współczynnik K_L:

- dla bardzo krótkich czasów $t' \ll \frac{L^2}{D}$

$$K_L = \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t'}} \qquad 2\text{-}8$$

- dla długiego czasu $t \gg \frac{L^2}{D}$

$$K_L = \frac{D}{L} \qquad 2\text{-}9$$

gdzie: oznaczenia jak poprzednio.

Pierwszy wzór odpowiada teorii penetracji, drugi - teorii dwu warstw granicznych.

Innym uogólnieniem obu teorii jest model absorbcji zaproponowany w 1964 roku przez Dobbinsa [7], który uzupełnił założenia Higbiego i Danckwertsa o założenie skończonej grubości warstwy granicznej cieczy L, w której poszczególne cząsteczki cieczy wymieniają się z rdzeniem cieczy. W wyniku rozważań Dobbins otrzymał zależność określającą wartość współczynnika przenikania gazu w następującej postaci:

$$K_L = \sqrt{\frac{D}{t'}} \operatorname{ctgh} \sqrt{\frac{L^2}{t' \cdot D}} \qquad 2\text{-}10$$

gdzie: oznaczenia jak poprzednio.

Manipulując odpowiednio czasem t' otrzymuje się wzór na współczynnik K_L zgodny z teorią Whitmana lub Danckwertsa. Równanie Dobbinsa uznawane jest aktualnie za słuszne [8].

Omówione teorie formułując modele absorbcji są teoriami ogólnymi, znajdującymi zastosowanie w każdym wypadku operacji natleniania niezależnie od sposobu technicznej realizacji tej operacji.

2.2. Teoretyczne podstawy operacji natleniania pęcherzykami sprężonego powietrza

Podejmowane były próby sformułowania modelu absorbcji ściśle dostosowanego do operacji natleniania realizowanej pęcherzykami sprężonego powietrza. Zagadnieniem tym zajmowali się między innymi Pasveer [9] (1955), Eckenfelder [10] (1959), Bewtra i Nicholas [11] (1960-62) oraz Poon [12] (1966).

Szczególnie interesująca jest praca Eckenfeldera [10], który sformułował wzór na współczynnik przenikania tlenu w sposób uwypuklający bezpośredni związek pomiędzy wartością współczynnika przenikania tlenu a prędkością ruchu pęcherzyków powietrza względem cieczy:

$$K_L = c \frac{V_p}{h^{1/3}} \cdot S_c^{-1/2} \quad ; \qquad 2\text{-}11$$

gdzie:

c - stała, $m^{1/2}$

V_p - prędkość ruchu pęcherzyka powietrza względem wody ; m/s

h - głębokość doprowadzenia powietrza; m

liczba Schmidta; bezwym.

ν - kinetyczny współczynnik lepkości wody, m^2/s

D - stała dyfuzji, m^2/h

Równanie powyższe obowiązuje dla ruchu pęcherzyków powietrza określonego następującym przedziałem wartości liczby Reynoldsa:

$$50 \leqslant R_e = \frac{d_p \cdot v_p}{\nu} \leqslant 500 \qquad 2\text{-}12$$

gdzie:

d_p - średnica pęcherzyka powietrza

v_p , ν - jak poprzednio

Zależność pomiędzy prędkością wznoszenia, a wielkością pęcherzyków sprężonego powietrza w wodzie określił A.Hörler [13]. Wyróżnił on cztery obszary wielkości pęcherzyków:

- w pierwszym obszarze przy wielkościach pęcherzyków do 0,15 mm mają one kształt regularnie kulisty, ich prędkość wznoszenia rośnie wraz ze wzrostem średnicy a ich ruch podlega prawu Stooksa
- w drugim obszarze przy wielkościach pęcherzyków od 0,15 mm do 2,1 mm pęcherzyki mają również kształt regularnie kulisty, wznoszą się szybko do góry, obserwuje się już cyrkulację pęcherzyków, prędkość wznoszenia rośnie wraz ze wzrostem średnicy
- trzeci obszar obejmuje pęcherzyki o wielkościach od 2,1 mm do 7,2 mm; przy tych wielkościach pęcherzyki przyjmują kształt spłaszczonych wirujących elipsoid, a prędkość wznoszenia maleje wraz ze wzrostem średnicy pęcherzyka
- czwarty obszar obejmuje pęcherzyki większe od 7,2 mm, które podczas ruchu do góry przyjmują kształt zbliżony do grzyba z górną częścią w postaci czaszy kulistej, prędkość wznoszenia znowu wzrasta proporcjonalnie do średnicy lecz wolniej niż poprzednio.

Hörler ustalił dla opisanych obszarów wzory na prędkość wznoszenia pęcherzyków w postaci:

$$v_p = B \cdot d_p^n \qquad 2\text{-}13$$

gdzie:

v_p - prędkość wznoszenia pęcherzyka w wodzie, m/s

d_p - średnica pęcherzyka powietrza, m

B, n - stałe zestawione w tablicy 2-1

Hörler nie był jedynym badaczem zajmującym się kształtem, wielkością i prędkością przepływu pęcherzyków gazu w cieczy. Przed nim zajmowali się tym problemem Van Krevelen i Hoftijzer [1], których wyniki zostały potwierdziły się w badaniach Hörlera. Istotnym jest stwierdzenie obu badaczy, że graniczna wartość liczby Reynoldsa pomiędzy przepływami laminarnym i turbuletnym wynosi $R_e = 10$. Wynika z tego, że cytowany już wzór Eckenfeldera dotyczy przepływów turbulentnych, zaś biorąc pod uwagę wartości wielkości pęcherzyków i prędkości ich wznoszenia wynikające z badań Hörlera i praktycznie występujące w urządzeniach napowietrzających wielkości pęcherzyków, można stwierdzić, że wymiana tlenu przy operacji natleniania zachodzi zawsze w warunkach burzliwych.

Szczegółową analizę przebiegu aeracji z zastosowaniem sprężonego powietrza można przeprowadzić wykorzystując prace [11],[12],[14]. Założono w nich [11] ,[12] fazowość zjawisk zachodzących w czasie napowietrzania.

Przebieg procesu napowietrzania pęcherzykami sprężonego powietrza przebiega następująco:

- pierwsza faza polega na formowaniu się pęcherzyków sprężonego powietrza w cieczy u wylotu z urządzenia do rozdziału sprężonego powietrza i odrywaniu pęcherzyków od wylotu,
- druga faza to wznoszenie się pęcherzyków powietrza do powierzchni zwierciadła cieczy,
- trzecia faza zachodzi na powierzchni zwierciadła cieczy i polega na rozrywaniu się pęcherzyków.

Proces wymiany tlenu z cieczą jest ciągły, lecz jego intensywność jest różna w wymienionych fazach i zależy od szeregu czynników takich jak: liczba pęcherzyków znajdujących się w cieczy, intensywność napowietrzania, prędkość wznoszenia się pęcherzyków ku

górze, cyrkulacja pęcherzyków w cieczy itd. Równoczesne uchwycenie wpływu wszystkich wymienionych czynników na efektywność wymiany tlenu jest kłopotliwe, stąd można na początku założyć występowanie przepływu pojedyńczych pęcherzyków powietrza w cieczy. Przepływ taki wystąpiłby przy swobodnym wypływie gazu z niewielkiego otworu do zbiornika z cieczą, wtedy gdy energia początkowa gazu wystarcza jedynie na oderwanie pęcherzyków gazu od otworu, zaś dalszy ruch pęcherzyków odbywa się pod wpływem sił działających na pęcherzyk powietrza w polu ciążenia ziemskiego. W pierwszej fazie aeracji, w trakcie formowania się pęcherzyka na wylocie otworu urządzenia do rozdziału powietrza, wokół formującego się pęcherzyka tworzy się otaczająca go warstwa cieczy w której na styku faz gaz - ciecz zachodzi błyskawiczna dyfuzja tlenu do cieczy. Opór tej warstwy składającej się z modekuł wodnych i gazowych utrudnia dalszą dyfuzję tlenu. Tę właśnie warstwę można nazwać graniczną. W drugiej fazie aeracji pęcherzyk powietrza wraz z otaczającą go warstwą cieczy zawierającej przedyfundowany gaz wznosi się prostoliniowo ku górze do zwierciadła cieczy. Składową ruchu pęcherzyka ku górze jest tarcie. Pod wpływem tarcia w cieczy następuje oderwanie części cząsteczek cieczy i gazu tworzących warstwę graniczną i wymieszanie ich z otaczającą cieczą. Zjawisku temu towarzyszy zmalenie oporu warstwy granicznej,i co za tym idzie,dalsza dyfuzja tlenu z wnętrza pęcherzyka do warstwy granicznej.
W trzeciej fazie aeracji następuje rozerwanie pęcherzyka powietrza przy zwierciadle cieczy i zmieszanie warstwy granicznej z otaczającą cieczą.

Opisane zjawiska będą przebiegały nieco inaczej jeżeli do rozważań przyjąć dużą liczbę pęcherzyków powietrza wydobywających się jednocześnie z wielu otworów z energią początkową

wyższą od tej, która jest wymagana dla oderwania się pęcherzyka od wylotu z urządzenia do rozdziału powietrza.

Przebieg pierwszej fazy aeracji jest w tym wypadku identyczny jak opisany poprzednio. Inaczej natomiast przebiega druga faza. Przy nadaniu pęcherzykom gazu pewnej prędkości początkowej tor ich wznoszenia odbiega od prostoliniowego, zaś kształt pęcherzyków przestaje być kulisty - pęcherzyki przybierają postać wirujących elipsoid lub grzybków. Skutkiem krzywoliniowości toru wznoszenia się pęcherzyków, ich niereguralnego, zmiennego kształtu i precesji następują zderzenia pęcherzyków i formowanie nowych pęcherzyków. Każdemu zderzeniu towarzyszy gwałtowne zniszczenie warstwy granicznej wokół pęcherzyków i wymieszanie jej z otaczającą cieczą. Wokół nowo utworzonych pęcherzyków tworzy się nowa warstwa graniczna istniejąca do następnego zderzenia. Rozrywanie się i tworzenie nowych pęcherzyków powoduje znaczne podwyższenie efektywności aeracji. Potwierdzenie opisanych zjawisk daje Baars [14], który obserwował w swoich pracach korzystny wpływ rozrywania i tworzenia nowych pęcherzyków powietrza na efektywność procesu aeracji.

Przebieg trzeciej fazy aeracji przy dużej liczbie pęcherzyków zależy od ich początkowej energii. W fazie tej może wystąpić jedynie rozrywanie pęcherzyków przy powierzchni zwierciadła cieczy, lub przy nieco większej energii pęcherzyków oprócz ich rozrywania może wystąpić również formowanie pęcherzyków powietrza cyrkulujących następnie do cieczy.

Dla tak ujętego procesu aeracji można napisać:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \qquad 2\text{-}14$$

gdzie: R - całkowita masowa prędkość wymiany gazu, $\frac{kg}{s}$

R_1 - prędkość wymiany gazu w I fazie, kg/s

R_2 - prędkość wymiany gazu w II fazie, kg/s

R_3 - prędkość wymiany gazu w III fazie, kg/s

Zgodnie ze stwierdzeniami zawartymi w pracy [11] można przy tym pominąć wpływ trzeciej fazy jako niewielki, przy konwencjonalnych systemach napowietrzania sprężonym powietrzem, w porównaniu z dwoma pierwszymi fazami.

Zgodnie z równaniem 2-3 można napisać dla I fazy równanie:

$$R_1 = K_{L_1} \cdot A_1 \cdot (C_{S_1} - C_L) \qquad 2\text{-}15$$

gdzie:

oznaczenia odpowiednio, jak w równaniu 2-3

Pole powierzchni wymiany w I fazie A_1 można ustalić drogą następującego rozumowania: pole powierzchni pojedyńczego pęcherzyka gazu wynosi πd^2 przy czym jest ono zmienne w czasie w sposób proporcjonalny do $f(t)$, zaś liczba pęcherzyków zależy od przepływu powietrza Q_p i objętości pojedyńczego pęcherzyka Vp. Sumaryczna powierzchnia wymiany w I fazie wyniesie:

$$A_1 = \frac{Q_p}{V_p} \cdot f(t) \cdot \pi d^2 \qquad 2\text{-}16$$

gdzie:

A_1 - powierzchnia wymiany w I fazie; m^2

Qp - przepływ sprężonego powietrza; m^3/s

Vp - objętość pojedyńczego pęcherzyka; m^3

$f(t)$ - funkcja zmienności powierzchni pęcherzyka w czasie trwania pierwszej fazy; s

d - średnica pęcherzyka; m

Analogicznie, dla II fazy można napisać równanie

$$R_2 = K_{L_2} \cdot A_2 \cdot (C_{S_2} - C_L) \qquad 2\text{-}17$$

gdzie:

oznaczenia odpowiednio jak w równaniu 2-3

Pole powierzchni wymiany w drugiej fazie można określić następująco:

$$A_2 = \frac{Q_p}{V_p} \cdot Fp \cdot f(t) \qquad 2\text{-}18$$

gdzie: Qp, Vp, f t - jak poprzednio

Fp - pole powierzchni pęcherzyka, m^2

Pole powierzchni pęcherzyka trzeba określić w sposób odmienny od poprzednio stosowanego, uwzględniając jego niesferyczny kształt:

$$\beta = \frac{F_p}{V_p} \cdot \frac{d}{6} \qquad 2\text{-}19$$

gdzie: β - współczynnik zmiany kształtu.

Funkcję czasu f(t) można określić następująco:

$$f(t) = \frac{\alpha \cdot h}{v} = \frac{\alpha \cdot h}{v_o + v_M} \qquad 2\text{-}20$$

gdzie:

h - głębokość zanurzenia urządzenia do rozdziału powietrza pod zwierciadło cieczy, m

α - współczynnik zwiększający drogę pęcherzyków powietrza ze względu na ich krzywoliniowy tor,

v - prędkość pęcherzyka powietrza; m/s stanowi ona sumę prędkości swobodnego wznoszenia pęcherzyków v_o i prędkości mieszaniny wodno-powietrznej v_M.

Ostatecznie wzór na pole powierzchni wymiany w II fazie przybiera postać:

$$A_2 = 6 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{Q_p}{d} \cdot \frac{h}{v_o + v_M} \qquad 2\text{-}21$$

Posługując się ustalonymi zależnościami można wzór 2-14 napisać w rozwinięciu:

$$R = K_{L_1} \cdot \frac{Q_p}{V_p} \cdot f(t) \cdot \pi d^2 \cdot (C_{S_1} - C_L) +$$

$$+ K_{L_2} \cdot 6 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{Q_p}{d} \cdot \frac{h}{v_o + v_M} (C_{S_2} - C_L) \qquad 2\text{-}22$$

Powyższe analityczne ujęcie faz procesu aeracji kryje w sobie znaczne uproszczenia, z których pierwszym było pominięcie udziału trzeciej fazy. Opis analityczny drugiej fazy wymiany sugeruje zależność szybkości wymiany jedynie od głębokości zanurzenia urządzenia do rozdziału powietrza, kształtu i ilości pęcherzyków oraz szybkości ich wznoszenia. Stanowi to kolejne, bardzo daleko posunięte uproszczenie polegające na całkowitym pominięciu wpływu rozrywania się i tworzenia nowych pęcherzyków na szybkość wymiany, który to wpływ jest wyraźnie eksponowany w szeregu prac nad napowietrzaniem. Mimo tak dalece posuniętych uproszczeń stosowanie równania /2-22/ w praktyce jest niemożliwe, ponieważ praktyczne pomierzenie szeregu wielkości wchodzących do równania /2-22/ jest bardzo trudne. W praktyce określa się sumaryczną szybkość wymiany masy, oraz całkowity współczynnik wymiany masy K_L.

Przykładem takie podejścia było przedstawione poprzednio równanie /2-11/ stworzone przez Eckenfeldera.
Równie praktyczne podejście zaprezentował Calvin P.C. Poon [12] wyprowadzając w 1966 roku teoretyczny model absorbcji tlenu przy napowietrzaniu pęcherzykowym. Rozważał on proces wymiany w ujęciu dwóch faz z pominięciem trzeciej przy czym ostatecznie sformułował wzór na współczynnik wymiany tlenu ujmujący obie fazy:

$$K_L = c \cdot \frac{p_1}{p_o} \frac{1}{\sqrt{d \cdot T}} \qquad 2\text{-}23$$

gdzie:

c - stała

p_o i p_1 --ciśnienia: bezwzględne i gazu w cieczy

d - średnica pęcherzyków

T - temperatura bezwzględna.

Szczegółowe rozważania Poona podobnie jak szeregu poprzednich badaczy nie są tu przytoczone gdyż zostały one opracowane w piśmiennictwie polskim [15] .

Ostatecznie powszechnie przyjmuje się obecnie równania kinetyki natleniania w formie określonej wzorami 2-3 i 2-4 [16] . Całkowanie tych równań w odpowiednich granicach prowadzi do uzyskania powszechnie przyjętych formuł do określania zdolności natleniającej urządzeń. Zostaną one zaprezentowane w p.7 niniejszej pracy.

3. Przegląd stosowanych urządzeń do rozdziału sprężonego powietrza w komorach osadu czynnego

Stosowane w praktyce urządzenia do rozdziału sprężonego powietrza w komorach osadu czynnego można podzielić następująco:

- dyfuzory porowate
- dyfuzory nie porowate
- urządzenia złożone.

Istota działania dyfuzorów porowatych polega na tym, że sprężone powietrze przedostaje się do cieczy przechodząc przez porowatą przegrodę, która dzieli strumień powietrza na szereg pęcherzyków wznoszących się swobodnie do zwierciadła cieczy w komorze napowietrzania.

Dyfuzory nie porowate obejmują szereg rozwiązań jak np: różnego rodzaju dysze typu inżektorowego, dysze pracujące z zastosowaniem elementów wprawianych w wibrację strumieniem przepływającego powietrza, perforowanych rur itp. Ten rodzaj dyfuzorów zostanie pominięty w niniejszym przeglądzie ze względu na odmienność konstrukcyjną w stosunku do urządzeń będących przedmiotem pracy.

Urządzenia złożone do rozdziału sprężonego powietrza obejmują

B PW

dwa typy rozwiązań konstrukcyjnych. Przykładem pierwszego z nich jest znane rozwiązanie, stosowane przez szereg firm zachodnioeuropejskich, w którym sprężone powietrze doprowadzone jest do umieszczonego nad dnem komory perforowanego pierścienia nad którym umieszczony jest napędzany mechanicznie wirnik. Wirnik ten rozdrabnia pęcherzyki powietrza wypływające z perforowanego pierścienia oraz spełnia rolę mieszadła zawartości komory napowietrzania. Działanie drugiego typu urządzeń złożonych, obecnie jeszcze mało znanych, polega na dostarczeniu sprężonego powietrza do przewodów z otworami ułożonych na dnie komory, przy czym nad każdym otworem ustawiony jest nieruchomy mieszalnik w postaci odcinka rury z wypełnieniem uformowanym w taki sposób, aby trafiające do mieszalnika sprężone powietrze zostało rozbite na szereg pęcherzyków i wymieszało się z porywaną spod mieszalnika cieczą. Ten typ urządzeń określany jest przez ich amerykańskich twórców terminem „static aerator" /dosł. aerator statyczny/, co zdaniem autora niniejszej pracy nie w pełni oddaje istotę zachodzącego w nim procesu i stąd proponuje używanie ogólnej nazwy mieszalnik statyczny.
Stosując jako kryterium podziału wielkość pęcherzyków powietrza wydobywających się z urządzenia do rozdziału sprężonego powietrza rozróżnia się urządzenia:

- drobnopęcherzykowe
- średniopęcherzykowe
- grubopęcherzykowe.

W ramach niniejszego przeglądu zostaną uwzględnione jedynie urządzenia drobno- i średniopęcherzykowe. Charakterystykę rozwiązań dyfuzorów porowatych oferowanych przez firmy europejskie zawiera tablica 3-1. [17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24],[25] . Zestawiono w niej nazwy, kształt, materiał, wymiary i parametry

techniczne dyfuzorów. Szczegółowe opisy większości z nich zawarte są w pracach [26], [27].

Jak wynika z danych zawartych w tablicy 3-1 produkcją dyfuzorów porowatych zajmuje się w Europie 6 firm z których trzy: Schumacher /RFN/ Activated Sludge Ltd /W.Bryt./ i Kuczinskij Zawod Ceramiczeskich Izdielij /ZSRR/ mają długoletnią tradycję w produkcji dyfuzorów porowatych. Wymienione trzy firmy oraz firma Degremont stosują jako materiał filtrosowy swoich dyfuzorów tradycyjne rozwiązania polegające na sklejeniu materiału ziarnistego lepiszczem. Warunkiem koniecznym jest zastosowanie materiałów ziarnistych i lepiszcz odpornych na korozyjne działanie mieszaniny ścieków z osadem czynnym i wysoka wytrzymałość mechaniczna uzyskanych materiałów porowatych. Szczegółowy skład materiału filtrosowego i sposób jego wytwarzania są chronione patentami. Dwie firmy skandynawskie: Nokia A.B. i Flygt stosują jako materiał porowaty swoich dyfuzorów tworzywa sztuczne o porowatej strukturze, przy czym podobnie jak w poprzednich wypadkach sposób produkcji chroniony jest patentami. Opisywane materiały filtrosowe formowane są w płyty, rury, dyski lub kołpaki o różnych wymiarach. Z prezentowanych w ostatnich latach prospektów można zorientować się że aktualną tendencją jest stosowanie dwóch postaci dyfuzorów: rur i dysków lub kołpaków. Osiągane przez dyfuzory parametry technologiczne wahają się w dość szerokich granicach zależnie od kształtu, wielkości i materiału filtrosowego dyfuzora. Granice parametrów technologicznych przedstawiają się następująco:

a/ dla dysków i kołpaków

- przepływ powietrza od 1 do 20 m^3/h, przy czym najczęściej występuje zakres przepływów 1,5 ÷ 7 m^3/h
- wysokość oporów przy przepływie sprężonego powietrza od 0,1 do 0,7 m H_2O

- zdolność natleniająca OC = 30 do 250 $gO_2/m^3 h$
  przy czym wartość OC najczęściej wynosi
  $50 \div 150\ gO_2/m^3 h$

b/ dla rur

- przepływ powietrza od 1,3 do 45 m^3/h, przy czym w większości wypadków $8 \div 25\ m^3/h$
- wysokość oporów przy przepływie sprężonego powietrza od 0,1 do 0,7 m H_2O
- zdolność natleniająca OC = 10 do 300 $gO_2/m^3 h$

Firmy produkujące opisane dyfuzory przewidują możliwość ich regeneracji jednym z trzech sposobów: płukanie wodą o wysokim ciśnieniu, kąpiel w roztworze detergentów, kąpiel w roztworze kwasu.

Szereg rozwiązań dyfuzorów z zastosowaniem porowatych materiałów filtrosowych oferują firmy amerykańskie [16],[28]. Nie różnią się one w zasadniczy sposób kształtem, wymiarami ani materiałem od już opisanych dyfuzorów oferowanych przez firmy europejskie. Podobnie można wyróżnić dwie tendencje w zakresie stosowanych materiałów filtrosowych: tradycyjne materiały o firmowych nazwach Keluendite, Filtros i Elektroflo oraz tworzywa sztuczne. W dostępnej literaturze jest niewiele danych dotyczących parametrów technologicznych dyfuzorów oferowanych przez firmy amerykańskie.

Urządzenia złożone do rozdziału sprężonego powietrza z mieszalnikami statycznymi oferowane są przez nieliczne firmy amerykańskie. Sposób rozwiązania jest we wszystkich wypadkach podobny: na dnie komory napowietrzania ułożonych jest szereg równoległych perforowanych przewodów rozdzielczych sprężonego powietrza. Nad każdym otworem wylotowym sprężonego powietrza umieszczony jest pionowo nieruchomy mieszalnik. Oferowane roz-

wiązania różnią się konstrukcją mieszalnika.

Kanadyjska firma Polcon [29] oferuje mieszalniki o nazwie Helixor /rys.3-1/. Mieszalnik ślimakowy Helixor, wykonany z tworzywa sztucznego, składa się z rury o średnicy ok. 0,5 m /18 cali/ i zmiennej długości równej 1,8 m /6′/, 2,7 m /9′/ lub 3,65 m /12′/. Wnętrze rury wypełnione jest ślimacznicą, która powoduje przedłużenie czasu kontaktu powietrza z cieczą. Zalecane przez firmę Polcon parametry pracy i efekty działania mieszalnika Helixor zestawiono w tablicy 3-2, zaś charakterystykę tlenową pokazano na rys.3-2.

Firma Kenics Corporation [30] oferuje mieszalniki o nazwie Kenics /rys.3-3/. Mieszalnik Kenics wykonany z tworzywa sztucznego składa się z 5 elementów o średnicy ok. 0,3 m i łącznej długości 1,5 m /5′/. Wnętrze każdego elementu wypełnia przegroda, z tym że w kolejnych elementach przegrody te przestawione są względem siebie o 90^{o}. Parametry pracy i efekty działania mieszalników Kenics według danych firmowych zestawiono w tablicy 3-3.

Firma Ralph B.Carter Company [31], [32], [33] oferuje mieszalnik Static Mixaerator /rys.3-4/. Materiał konstrukcyjny mieszalnika nie jest znany /przypuszczalnie tworzywo sztuczne/. Mieszalnik składa się z rury o średnicy ok. 0,3 m /1′/ i wysokości ok. 0,9 m /3′/. Wewnątrz rury umieszczono 3 do 4 przegród w postaci siatek o sześciokątnych oczkach o maksymalnym wymiarze 7,6 cm /3"/. Ponad każdą z przegród wykonano w rurze tworzącej obudowę mieszalnika otwór dla dodatkowego zassania cieczy. Parametry pracy i efekty działania mieszalnika Static Mixaerator zestawiono w tabl.3-4.

W posiadaniu autora niniejszej pracy znajdują się również materiały firmy Aqua Aerobic International z których wynika, że

firma stosuje mieszalniki statyczne, jednakże brak ich bliższej charakterystyki poza pojedyńczą fotografią bez szczegółów i wymiarów.

Powyższy przegląd urządzeń stosowanych do rozdziału sprężonego powietrza w komorach osadu czynnego wskazuje na to, że w dziedzinie dyfuzorów porowatych zaczęto stosować w praktyce rozwiązania techniczne oparte na porowatych tworzywach sztucznych, zaś w urządzeniach złożonych nowością jest stosowanie nierurowych mieszalników zamiast napędzanych mechanicznie mieszadeł.

4. Koncepcja technologiczno-konstrukcyjna dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych

4.1. Uzasadnienie podjęcia badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych

W technice oczyszczania ścieków jedną z najbardziej atrakcyjnych i najczęściej stosowanych metod biologicznego oczyszczania ścieków jest proces osadu czynnego. Istotą tego procesu jest zamiana mieszaniny substancji organicznych na żywą masę organizmów osadu czynnego w pierwszym etapie oczyszczania ścieków, oddzielenie masy organizmów osadu czynnego od ścieków oczyszczonych w drugim etapie oczyszczania ścieków i unieszkodliwienie oddzielonego osadu w trzecim etapie.

Stosowanie tej metody chociaż szeroko rozpowszechnione natrafia jeszcze na szereg barier wynikających z niedostatecznej znajomości wszystkich czynników decydujących o końcowym efekcie oczyszczania ścieków. Aktualnie badania nad tą metodą przebiegają w dwóch kierunkach:

- pogłębienie znajomości kinetyki rozkładu substancji organicznych i wykorzystania produktów tego rozkładu przez żywe mikroorganizmy oraz badania nad prawidłowym składem mikroorganizmów i uszczegółowienie parametrów technologicznych procesu
- poszukiwanie korzystnych pod względem ekonomicznym form technicznej realizacji procesu tj. badania konstrukcji urządzeń służących do oczyszczania ścieków osadem czynnym.

W ramach tej drugiej grupy badań istotne miejsce zajmuje wybór odpowiednich systemów napowietrzania.

Wdrażane w ostatnich latach w kraju systemy napowietrzania oparte były głównie na napowietrzaniu powierzchniowym aeratorami mechanicznymi o osi pionowej /aerator AP konstrukcji PoWoGaz, aerator Silesia konstrukcji dr Stysiała, aerator Potap konstrukcji B.S.P.i R.I. Przemysłu Mleczarskiego, aerator Biprowod itd./, o osi poziomej /szczotki napowietrzające/ lub na płytkim napowietrzaniu grubopęcherzykowym znanym pod nazwą systemu Inka. Jednocześnie obserwuje się całkowity brak lub tylko nieliczne wypadki stosowania systemu głębokiego napowietrzania sprężonym powietrzem, mimo oczywistych i szeroko na świecie uznawanych zalet tego sposobu napowietrzania. Sytuacja ta uzasadniona jest brakiem produkcji na rynku krajowym podstawowych elementów konstrukcyjnych wchodzących w skład tego systemu napowietrzania takich jak: dmuchawy, elastyczne złącza przewodów sprężonego powietrza i urządzeń do rozdziału sprężonego powietrza wewnątrz komór napowietrzania. Temat wdrożenia systemu głębokiego napowietrzania był i jest podejmowany w piśmiennictwie fachowym [27], [34] i opracowaniach studialnych [35]. Wynika z nich, że wdrożenie systemu głębokiego napowietrzania do praktyki oczyszczania ścieków w kraju jest niezbędne i dlatego należy dążyć do pokona-

nia wszelkich trudności uniemożliwiających to wdrożenie.

Problemowi źródeł sprężonego powietrza tj. dmuchaw produkcji krajowej były poświęcone opracowania [26], [27] z których wynika, że istnieją w kraju dmuchawy nadające się po zmodernizowaniu ich konstrukcji do zastosowania przy głębokim napowietrzaniu zawartości komór osadu czynnego.

Podejmowane w kraju próby uruchomienia produkcji seryjnej urządzeń do rozdziału sprężonego powietrza w komorach napowietrzania zakończyły się niepowodzeniem. W tej sytuacji brak w chwili obecnej krajowego urządzenia do rozdziału sprężonego powietrza w komorach napowietrzania.

Problem rozdziału sprężonego powietrza w komorach aeracji z osadem czynnym przy głębokim napowietrzaniu można, w świetle przeglądu znanych rozwiązań, sprowadzić do szczególnego przypadku filtracji gazu pod ciśnieniem przez przegrodę porowatą umieszczoną pomiędzy gazem a cieczą. Proces filtracji płynów przez przegrody porowate jest szeroko stosowany w różnych dziedzinach techniki takich jak inżynieria chemiczna, motoryzacja itd. Jedną z odmian tego procesu jest filtracja gazów przez filtry tkaninowe dla usunięcia z nich pyłów przed ich transportem przewodami dla ochrony urządzeń sprężających powietrze i przewodów przed zanieczyszczeniem. Dobre efekty tej operacji w zakresie filtracji zanieczyszczeń przy niedużych stratach ciśnienia nasunęły myśl wykorzystania idei filtracji powietrza przez tkaninę do rozdzielania sprężonego powietrza przy napowietrzaniu cieczy.

Stosowanie tkanin w dziedzinie uzdatniania wody i oczyszczania ścieków ma już pewną tradycję w postaci mikrosit lub tkanin filtracyjnych w prasach dla odwadniania osadów ściekowych. Poszukiwania w piśmiennictwie fachowym doprowadziły do potwier-

dzenia idei wykorzystania tkanin z tworzyw sztucznych dla rozdziału sprężonego powietrza przy głębokim napowietrzaniu komór osadu czynnego w ZSRR i USA, co zostanie przedstawione w następnym rozdziale. Trudno przewidzieć jak daleko zostaną one zastosowane gdyż w obu wymienionych krajach są przedmiotem produkcji fabrycznej dyfuzory porowate z tradycyjnych materiałów.

Analiza piśmiennictwa fachowego w zakresie podstaw teoretycznych operacji napowietrzania doprowadziła do stwierdzenia, że podstawowe znaczenie dla efektywności procesu ma turbulencja mieszaniny gazowo-wodnej oraz częstotliwość wymiany powierzchni międzyfazowej i czas kontaktu gazu z cieczą. W rozwiązaniach praktycznych podejmowane są próby wykorzystywania powyższego stwierdzenia w postaci opisanego już złożonego sposobu napowietrzania polegającego na umieszczaniu nad wlotem gazu do cieczy mieszadła mechanicznego, którego zadaniem jest rozbijanie formujących się pęcherzyków sprężonego powietrza i mieszanie zawartości komory aeracji. Słabą stroną tego systemu napowietrzania jest konieczność stosowania dwóch urządzeń oddzielnie zasilanych w energię: urządzenia służącego do sprężania powietrza i urządzenia do mieszania. Na tym tle nasunęła się idea zastosowania nieruchomego mieszalnika umieszczonego nad wlotem powietrza do cieczy, spełniającego podobną rolę jak mieszadło napędzane silnikiem w systemach złożonego napowietrzania. Konstrukcja takiego mieszalnika w postaci szeregu równolegle umieszczonych w obudowie siatek wyniknęła na tle badań prowadzonych w Zakładzie Zaopatrzenia w Wodę i Oczyszczania Ścieków Politechniki Warszawskiej nad zastosowaniem siatek do komór flokulacji i wypełnień złóż biologicznych.

Proponowane rozwiązanie w innych nieco odmianach konstrukcyjnych zostało potwierdzone praktyką, ponieważ w trakcie badań

realizowanych przez autora niniejszej pracy pojawiły się doniesienia literaturowe i prospekty firm amerykańskich oferujących mieszalniki statyczne opisane w p.3.

4.2. Aktualny stan badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych

Ustalenia aktualnego stanu badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych dokonano w oparciu o rozpoznanie piśmiennictwa krajowego i zagranicznego. W piśmiennictwie krajowym brak informacji o prowadzeniu badań nad konstrukcją i działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych. Doniesienia piśmiennictwa zagranicznego są nieliczne i zawierają niewiele danych.

W literaturze radzieckiej [23], [24] wspomniano o zastosowaniu dyfuzorów tkaninowych. Pierwsza z cytowanych prac [23] zawiera jedynie ogólnikowe stwierdzenia o próbach ich wdrażania bez podawania szczegółów. Druga praca [24] zawiera więcej danych. Autorzy tej pracy prowadzili w Instytucie WODGEO badania nad zastosowaniem tkanin jako materiału filtrosowego dla dyfuzorów. Sformułowano przy tym ogólne wymagania jakie powinna spełniać tkanina przeznaczona do tego celu:

- nici osnowy powinny być gładkie, co prowadzi do obniżenia oporów hydraulicznych i ułatwia regenerację
- nici powinny charakteryzować się dużą wytrzymałością mechaniczną i odpornością chemiczną, przy czym powinny być obojętne dla mikroorganizmów osadu czynnego
- pęcznienie nici przy długim ich przebywaniu w cieczy powinno być minimalne, aby nie zmniejszać przepuszczalności tkaniny i nie powodować przyrostu strat ciśnienia.

Zdaniem autorów pracy [24] wymagania te idealnie spełniają tkaniny z tworzyw sztucznych. Badania nad tymi tkaninami doprowadziły do: stwierdzenia przydatności tkanin oznaczonych numerami 56007; 1520 i 56026 jako materiału filtrosowego. Opracowane przy tym charakterystyki hydrauliczne pokazano na rys.4-1. Porównanie charakterystyki tkanin z tradycyjnymi materiałami filtrosowymi doprowadziło w tym wypadku do wniosku, że wysokość oporów stawianych przez tkaniny przekracza opory materiałów tradycyjnych. W cytowanej pracy [24] brak danych dotyczących efektywności natleniania i energetycznej poza ogólnym stwierdzeniem, że nie są one gorsze od dyfuzorów z tradycyjnym materiałem filtrosowym. Wspomniano również o próbach wdrożenia dyfuzorów tkaninowych w 2 przemysłowych oczyszczalniach ścieków. Przy tej okazji dokonano ciekawych spostrzeżeń dotyczących sposobu formowania i mocowania tkanin. Stwierdzono mianowicie, że korzystne jest formowanie dyfuzorów w rury lub dyski, natomiast próba umocowania tkaniny do ramy aby w ten sposób utworzyć dyfuzor płytowy stwarza problemy gdyż tkanina wyrywa się z mocowań. Ponadto stwierdzono, że opory tkanin rosną po okresie 2-letniej eksploatacji do ok. 0,6 m H_2O, z tym, że nagromadzone zanieczyszczenia można łatwo usunąć przez płukanie tkanin.

W literaturze amerykańskiej [16] opisane są dyfuzory tkaninowe „Raypro" o średnicy od 50 do 76 mm i długościach od 0,15 do 0,6 m. Jednakże poza stwierdzeniem, że efektywność ich działania dorównuje rozwiązaniom tradycyjnym brak bliższych szczegółów.

W dotychczasowych pracach brak jest badań bezpośrednio dotyczących mieszalników siatkowych. Można tu natomiast nawiązać do badań dotyczących mieszalników statycznych, do których zalicza się mieszalnik siatkowy.

Piśmiennictwo zagraniczne dotyczące mieszalników statycznych, chociaż nieliczne, zawiera sporą ilość informacji stanowiących

opracowane wyniki badań [29], [30], [31], [32], [33], [36], [37]. Analiza powyższych prac pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków dotyczących stanu badań nad mieszalnikami statycznymi:

1. We wszystkich wypadkach badano zdolność natleniającą układu z zastosowaniem mieszalników w funkcji napełnienia zbiornika oraz przepływu powietrza przez mieszalnik. W pracach [30], [31] [32], [33] przyjmowano jako zmienne napełnienie zbiornika przy niezmiennej długości mieszalnika, zaś w wypadku firmy Polcon [29] długość mieszalnika wzrastała wraz z napełnieniem zbiornika.
2. We wszystkich wypadkach badano efektywność energetyczną układu napowietrzającego z mieszalnikiem w funkcji napełnienia zbiornika oraz przepływu powietrza przez mieszalnik.
3. W pracach [30], [37] badano zdolność mieszalnika do pompowania cieczy.
4. W pracy [30] badano rozkład prędkości cyrkulacji cieczy w zbiorniku napowietrzanym z zastosowaniem mieszalnika.
5. W pracach [31], [36] zaproponowano na podstawie rozważań teoretycznych metodę interpretacji wyników badań nad wydajnością tlenową układu napowietrzającego z mieszalnikiem prowadzącą do uwzględnienia zjawisk towarzyszących rozprężaniu się gazu w drodze od miejsca jego wprowadzenia do zwierciadła cieczy.

Metodycznie najistotniejszym szczegółem podawanym w pracach [31], [37] jest zastosowanie pustej obudowy mieszalnika jako układu odniesienia do badań.

4.3. Teoretyczne przesłanki działania i konstrukcji mieszalników siatkowych

Na podstawie opisanego w p.2.2. przebiegu wymiany tlenu przy napowietrzaniu można stwierdzić, że podstawowe znaczenie przy aeracji pęcherzykami sprężonego powietrza ma II faza tego procesu. Sposób realizacji tej fazy będzie więc decydował o ostatecznej szybkości procesu wymiany tlenu.

Intensyfikację procesu wymiany tlenu w drugiej fazie polegającej na rozrywaniu i tworzeniu nowych pęcherzyków można osiągnąć przez łączne lub rozdzielne zastosowanie następujących zabiegów:

- wprowadzenie do cieczy dużej ilości małych pęcherzyków powietrza /duża powierzchnia wymiany/
- zwiększenie turbulencji mieszaniny wodnopowietrznej /intensyfikacja rozrywania i tworzenia nowych pęcherzyków/.

O wielkości wprowadzanych pęcherzyków sprężonego powietrza decyduje rodzaj materiału użytego do rozdziału powietrza w zbiorniku. Istnieje przy tym pewne ograniczenie techniczne, gdyż użycie materiału o bardzo małych porach może doprowadzić do odwrotnego od zamierzonego efektu na skutek zaślepienia pewnej ilości porów cieczą znajdującą się w zbiorniku na zasadzie zjawiska kapilarności. Ponadto wraz ze zmniejszaniem wielkości porów zwiększają się opory przy przepływie powietrza przez materiał porowaty, co rzutuje na energetyczną stronę procesu. Wydaje się, że na obecnym poziomie rozwoju techniki materiały porowate stosowane dla rozdziału powietrza przy napowietrzaniu drobnopęcherzykowym zadowalająco rozdrabniają powietrze.

Zwiększenie turbulencji mieszaniny wodno-powietrznej można osiągnąć dwoma sposobami:

- zwiększenie intensywności napowietrzania
- wprowadzenie dodatkowego mieszania.

Podwyższenie intensywności napowietrzania jest zabiegiem stosunkowo prostym technicznie lecz prowadzącym do wzrostu energochłonności procesu napowietrzania. Zwiększenie intensywności napowietrzania powoduje dostawanie się w tym samym czasie większej ilości powietrza do cieczy przez co zwiększa się ilość pęcherzyków, przy jednoczesnej większej ich energii początkowej. Skutkiem tego jest podwyższenie częstotliwości zderzeń pęcherzyków, a co za tym idzie rozrywania i tworzenia nowych pęcherzyków Istnieje przy tym pewna graniczna wielkość ilości powietrza dostarczanego do układu. Po jej przekroczeniu efekt zaczyna być odwrotny od zamierzonego - intensywność wymiany tlenu maleje. Powodem tego jest z jednej strony zbyt duża energia początkowa pęcherzyków, które zbyt szybko wznoszą się ku górze, z drugiej zaś strony zbyt duży udział powietrza w mieszaninie wodno-powietrznej. Nadmiar powietrza powoduje, że warstwa graniczna po rozerwaniu się pęcherzyka nie ma możliwości wymieszania się z otaczającą cieczą, ponieważ jest ona nasycona całkowicie tlenem z sąsiednich warstw granicznych. Również nowo utworzone pęcherzyki otaczane są cieczą zawierającą rozpuszczony tlen, co powoduje obniżenie prędkości dyfuzji. Konsekwencją opisanego zjawiska jest zmniejszenie wymiany tlenu. Zjawisko zmniejszenia szybkości wymiany tlenu przy wzrastającej intensywności napowietrzania obserwowali między innymi Gańczarczyk i Suschka [38].

Wprowadzenie dodatkowego mieszania w trakcie drugiej fazy - wznoszenia się pęcherzyków ma za zadanie wzmożenie procesu rozrywania i tworzenia nowych pęcherzyków powietrza oraz ułatwienie mieszania się warstw granicznych rozerwanych pęcherzyków z otaczającą je cieczą. W rezultacie należy oczekiwać podwyższenia szybkości wymiany tlenu. Znanym technicznym rozwiązaniem dodatkowego mieszania jest umieszczenie nad urządzeniem do rozdziału

powietrza mieszadła mechanicznego. Sposób ten obarczony jest istotną wadą w postaci konieczności umieszczenia w cieczy ruchomego urządzenia wymagającego osobnej dostawy energii. Innym możliwym do zastosowania rozwiązaniem jest wykorzystanie do mieszania energii wprowadzanej do układu z pęcherzykami sprężonego powietrza poprzez umieszczenie nad urządzeniem do rozdziału powietrza nieruchomego mieszalnika spełniającego tę samą rolę co mieszadło mechaniczne. Mieszalnik ten powinien mieć kształt zwartej obudowy z umieszczonymi wewnątrz przegrodami. Zadaniem przegród jest spowodowanie rozrywania pęcherzyków i tworzenia nowych oraz wytworzenie turbulencji mieszaniny wodno powietrznej dla ułatwienia mieszania nasyconych tlenem warstw granicznych z otaczającą je cieczą. Wprowadzenie odpowiednio dużej liczby przegród, powinno ponadto spowodować wydłużenie czasu kontaktu gazu z cieczą co również sprzyja podwyższeniu ilości wymienianego tlenu. Użycie zwartej obudowy mieszalnika umieszczonego w pewnej odległości nad urządzeniem do rozdziału sprężonego powietrza w zbiorniku z cieczą powinno także spowodować wystąpienie zjawiska ssania cieczy do wnętrza mieszalnika, oraz powinno uporządkować ruch cieczy w zbiorniku poprzez jej wymuszoną cyrkulację na zewnątrz mieszalnika. Wydłużenie czasu kontaktu gazu z cieczą i uporządkowanie ruchu cieczy w zbiorniku są niewątpliwie korzystne i sprzyjają wymianie tlenu. Techniczne rozwiązanie konstrukcji przegród powinno spełniać warunek niezapychania się przegród przy napowietrzaniu mieszaniny ścieków z osadem czynnym. Rozwiązaniem spełniającym oba wymagania - procesowe i techniczne jest użycie siatek o dostatecznie dużych oczkach jako przegród mieszalnika. Potwierdzenie powyższych koncepcji wymaga przeprowadzenia odpowiednio sformułowanego eksperymentu, którego zadaniem będzie

wykazanie wpływu istnienia przegród na efektywność wymiany tlenu. Wpływ ten można stwierdzić drogą porównania efektywności działania dwóch układów: układu z obudową mieszalnika pozbawioną przegród, oraz układu z przegrodami. Dla takich dwóch układó można napisać równanie /2-14/ następująco:

$$R' = R_1' + R_2' + R_3' \qquad 4\text{-}1$$

$$R'' = R_1'' + R_2'' + R_3'' \qquad 4\text{-}2$$

Występującą w tych równaniach szybkość wymiany w II fazie R_2 można ująć następująco:

$$R_2 = R_W + R_M \qquad 4\text{-}3$$

gdzie:

R_W - szybkość wymiany przy wznoszeniu się pęcherzyków gazu

R_M - szybkość wymiany przy dodatkowym mieszaniu.

Zakładając, że w obu eksperymentach wielkości R_1, R_3 i R_W są sobie równe można wyjściowe równania odjąć stronami otrzymując:

$$\Delta R = R_M \qquad 4\text{-}4$$

Słuszność uczynionego założenia jest ograniczona. O ile można założyć równość R_1 i R_2 w obu eksperymentach, o tyle założenie równości R_W nie jest w pełni słuszne ponieważ przy wprowadzeniu przegród do mieszalnika musi nastąpić zmiana charakteru wznoszenia pęcherzyków która ma swoje konsekwencje w szybkości wymiany II fazy. Bardziej prawidłowe zatem jest przyjęcie:

$$\Delta R \approx R_M \qquad 4\text{-}5$$

i założenie że różnica ogólnej szybkości wymiany w obu eksperymentach jest proporcjonalna do wpływu dodatkowego mieszania na ogólną szybkość wymiany.

Na tle powyższych rozważań nasuwają się dwa kolejne zagadnienia wymagające wyjaśnienia w toku badań nad mieszalnikami siatkowymi. Pierwszym z nich jest wpływ rozstawu przegród na efektywność procesu wymiany. W świetle opisu zjawiska absorbcji tlenu należy oczekiwać, że w miarę zmniejszania się rozstawu przegród efektywność wymiany tlenu będzie wzrastała ponieważ zwiększa się częstotliwość rozrywania i tworzenia nowych pęcherzyków, rośnie czas wymiany i polepszają się warunki mieszania. Drugim zagadnieniem jest wpływ intensywności napowietrzania na efektywność procesu wymiany tlenu w układach z mieszalnikami siatkowymi. Wydaje się, że wpływ ten podlega ogólnym prawidłowościom wyprowadzonych na początku, tym bardziej że w układach bez mieszalnika można oczekiwać występowania zjawiska dodatkowego dopływu cieczy do słupa mieszaniny wodno-powietrznej z boku, co nie jest możliwe w układach z mieszalnikiem o zwartej obudowie. Można zatem oczekiwać, że efektywność wymiany tlenu w układach z mieszalnikami będzie rosła wraz z przyrostem intensywności napowietrzania do określonej wartości po czym zmaleje.
Można oczekiwać że układy z mieszalnikami dadzą również i inną ciekawą możliwość w postaci użycia bezfiltrosowego doprowadzenia powietrza jeżeli tylko efektywność działania takich układów nie będzie drastycznie odbiegać od układów z doprowadzeniem powietrza za pomocą filtosów. Pozwoliłoby to na zmniejszenie energochłonności procesu napowietrzania w stosunku do układów konwencjonalnych.

4.4. Opis proponowanych nowych konstrukcji urządzeń do napowietrzania

4.4.1. Dyfuzor tkaninowy

Dyfuzor tkaninowy jest przedmiotem patentu zarejestrowanego w Urzędzie Patentowym PRL pod numerem P 175873 jako „Dyfuzor

do gazowania cieczy, zwłaszcza do napowietrzania ścieków" [39].
Patent powyższy zawiera następujące zastrzeżenia patentowe:

„ 1. Dyfuzor do gazowania cieczy, zwłaszcza do napowietrzania ścieków składający się z przegrody porowatej utwierdzonej w obudowie i oddzielającej komorę sprężonego gazu od cieczy, znamienny tym, że przegroda /3/ jest wykonana z materiału wiotkiego, korzystnie z tkaniny.

2. Dyfuzor według zastrz.1, znamienny tym, że jego przegroda /3/ ma kształt worka, korzystnie wydłużonego.

3. Dyfuzor według zastrz.1, znamienny tym, że jego przegroda /3/ ma kształt powłoki zamykającej lej."

Zgodnie z cytowanymi zastrzeżeniami i opisem patentowym przewiduje się dwa zasadnicze sposoby formowania dyfuzorów tkaninowych pokazane na rys. 4-2 i 4-3. Na rys. 4-2 pokazano przykładowo dyfuzor tkaninowy o konstrukcji zbliżonej do tradycyjnej konstrukcji dyfuzora dyskowego. Tkanina /4/ nałożona jest na lej /2/ zaopatrzony w dolnej części w króciec z gwintem /1/ umożliwiającym wkręcenie dyfuzora w przewód sprężonego powietrza. Tkanina /4/ zaciskana jest w wyżłobieniu zewnętrznej górnej części leja opaską zakończoną zaciskiem z zawleczką /3/. Na rys.4-3 pokazano przykład rozwiązania dyfuzora tkaninowego w formie długiego rękawa /4/ naciągniętego na perforowaną rurę z tworzywa sztucznego /3/ wkręconą w trójnik /1/. Rękaw z tkaniny zaciskany jest powyżej nadlewów trójnika /1/ opaską z zaciskiem i zawleczką /2/. Pokazany na rys.5-2 dyfuzor tkaninowy rurowy może być mocowany do trójnika /gdy występuje w środku sekcji takich dyfuzorów/ lub do kolena /gdy występuje jako ostatni w sekcji dyfuzorów/.

4.4.2. Mieszalnik siatkowy

Mieszalnik siatkowy jest przedmiotem patentu zarejestrowanego w Urzędzie Patentowym PRL pod numerem P-200673, pod nazwą

„Urządzenie do gazowania cieczy" [40], przy czym według stanu na 31.12.1977 postępowanie patentowe nie było zakończone. Opis patentowy zawiera następujące zastrzeżenia:

„1. Urządzenie do gazowania cieczy zaopatrzone w zbiornik wypełniony przeznaczoną do gazowania cieczą, oraz umieszczony w dolnej części tego zbiornika dyfuzor, znamienne tym, że nad dyfuzorem /2/ jest umieszczona zatopiona w cieczy pionowo ustawiona, pracująca we współprądzie kontaktowa kolumna /3/ wyposażona wewnątrz w przegrody /4/ szykanujące przepływ gazu przez ciecz, przy czym wysokość kolumny /3/ jest mniejsza od wysokości napełnienia cieczą zbiornika /1/, a jej usytuowanie w kierunku pionowym zapewnia pozostawienie pod i nad kolumną wolnych przestrzeni /5/, /6/.

2. Urządzenie według zastrz.1, znamienne tym, że przegrody /4/ są korzystnie elementami siatkowymi".

Przykład rozwiązania mieszalnika siatkowego pokazano na rys.4-4. Mieszalnik składa się z obudowy /5/ wewnątrz której umieszczono w określonych odstępach siatki /4/. Obudowa mieszalnika umocowana jest do nóg /3/ wbetonowanych w płytkę /1/. Do płytki /1/ zamocowany jest za pomocą wbetonowanych w nią uchwytów z drutu perforowany przewód sprężonego powietrza /2/.

5. Sformułowanie zagadnień wymagających badań

Analiza teoretycznych podstaw procesu natleniania, urządzeń stosowanych do rozdziału sprężonego powietrza oraz analiza stanu badań nad urządzeniami stanowiącymi przedmiot pracy pozwalają na sformułowanie następujących zagadnień wymagających badań w ramach niniejszej pracy:

1. Zbadanie charakterystyki hydraulicznej dyfuzorów tkaninowych wykonanych z tkanin krajowych, obejmującej zależność oporów

przy przepływie sprężonego powietrza od intensywności napowietrzania dla zmiennych wysokości słupa wody nad dyfuzorem.

2. Zbadanie charakterystyki technologicznej dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych obejmującej:
   - zależność efektywności natleniania od intensywności napowietrzania i napełnienia zbiornika w którym odbywa się napowietrzanie
   - zależność efektywności energetycznej operacji natleniania od intensywności napowietrzania i napełnienia zbiornika.
3. Zbadanie wpływu wysokości mieszalnika siatkowego na efektywność operacji natleniania.
4. Zbadanie wpływu rozstawu siatek w mieszalniku siatkowym na szybkość wymiany tlenu.
5. Zbadanie wpływu sposobu doprowadzenia sprężonego powietrza pod mieszalnik na efektywność natleniania układu.
6. Zbadanie efektywności ekonomicznej nowych konstrukcji urządzeń do napowietrzania.

6. Metodyka i zakres badań

6.1. Ogólny opis zastosowanej metodyki

Badania nad działaniem dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych zrealizowano na stanowisku badawczym opisanym w dalszej części niniejszej pracy.

Główną trudnością występującą w badaniach nad napowietrzaniem wody lub ścieków w niepełnej skali technicznej jest brak jednoznacznego poglądu co do kształtu i wielkości komory w której bada się urządzenia do rozdziału sprężonego powietrza. Powszechnie znanym jest fakt, że kształt, wymiary komory, sposób i miejsce montażu w niej urządzeń do rozdziału powietrza mają zasadniczy

wpływ na bezwzględne wartości charakterystyk efektywności badanych urządzeń. Konsekwencją tego jest otrzymywanie wyników, których wartości bezwzględne są nieporównywalne z innymi danymi, a szczególnie z wartościami otrzymywanymi w praktyce. Dla pokonania tej trudności w badaniach zrealizowanych w ramach niniejsze pracy posłużono się jako układem odniesienia przy badaniu dyfuzorów tkaninowych oryginalnymi dyfuzorami HKL 210 firmy NOKIA, które przebadano w tych samych warunkach, co dyfuzory tkaninowe. Podobne podejście do sprawy dla mieszalników siatkowych nie było możliwe, ponieważ w trakcie realizacji badań nie było w kraju urządzenia, które mogłoby stanowić układ odniesienia.
Dla wyjaśnienia zagadnień wymagających badań sformułowanych w p.5 niniejszej pracy zakresem badań objęto trzy grupy pomiarów:

- optyczną ocenę działania urządzeń za pomocą wizjerów zamontowanych w stanowisku badawczym
- pomiary oporów hydraulicznych przy przepływie powietrza przez badane dyfuzory za pomocą dalej opisanego układu pomiarowego
- pomiary efektywności natleniania wody dyfuzorami i mieszalnikami siatkowymi.

6.2. Opis urządzeń doświadczalnych

Stanowisko do badań nad działaniem dyfuzorów i mieszalników siatkowych pokazano na rys.6-1. Stanowisko składało się z następujących elementów:

- zbiornik
- źródło sprężonego powietrza
- wyposażenie pomiarowe i regulacyjne
- stacja miareczkowa

Zbiornik w którym prowadzono proces napowietrzania, oznaczony/1/

na rys. 6-1, miał objętość całkowitą ok. 2,5 m^3, wymiary: długość 1 m, szerokość 1 m i wysokość 2,5 m wykonany był z blach stalowych wzmocnionych kątownikami. Zbiornik wyposażono w 12 okien /2/ ze szkła organicznego o wymiarach 0,2 x 0,2 m, 6 króćców do poboru prób wody /3/, oraz spust /4/ w postaci odcinka przewodu zakończonego zaworem. Króćce do poboru próbek wody /3/ wykonano w formie rurek o średnicy 20 mm i długości ok. 0,15 m wspawanych prostopadle w czołowe blachy zbiornika /1/ w ten sposób, że ok. 0,12 m rurki znajdowało się we wnętrzu zbiornika, zaś na wystające na zewnątrz nagwintowane końce rurek nakręcono odcinki przewodów PCV zakończone zaworami czerpalnymi. Punkty poboru próbek wody /3/ rozstawiono na trzech poziomach od dna /+ 55 cm; + 145 cm; + 210 cm/ w ten sposób, że 3 spośród nich znajdowały się w osi zbiornika zaś 3 w odległości ok. 0,15 m od bocznej ściany zbiornika /1/. Do odnogi trójnika wmontowanego w przewód spustowy /4/ wkręcono wyskalowaną rurkę wodowskazową /5/ umożliwiającą ocenę stanu napełnienia zbiornika.

Źródłem sprężonego powietrza była sprężarka tłokowa WAN-E /6/ o nominalnej wydajności do 20 m^3/h powietrza.

Na wyposażenie regulacyjne i pomiarowe składały się zawory, rotametry i manometry. Reduktor ciśnienia /7/ znajdujący się na wylocie sprężonego powietrza ze zbiornika powietrznego sprężarki służył do regulacji natężenia przepływu powietrza przez badane urządzenia. Na przewodzie doprowadzającym sprężone powietrze do badanych urządzeń umieszczono manometr z rurką Bourdona /8/ o zakresie mierniczym 0 do 1,6 kG/cm^2 skalowany co 0,1 kG/cm^2 z dokładnością do 0,01 kG/cm^2 /ok. 10 cm H_2O/ oraz dwa rotametry /9/: RIN - 253 o długości skali 500 mm i zakresie mierniczym 0 do 20 m^3/h powietrza i RUN - 165 o długości skali 250 mm i zakresie mierniczym 0 do 5 m^3/h powietrza. Rotametry /9/ były

połączone równolegle w ten sposób, że mniejszy z nich był zbocznikowany względem większego. Zawory /10/ służyły do włączania w trakcie pomiaru rotametru o odpowiednim zakresie mierniczym. Oprócz wymienionego już manometru /8/ zastosowano dla dokładnych pomiarów manometr różnicowy cieczowy /11/ umocowany do zbiornika /1/. Sposób połączenia tego manometru do badanego dyfuzora pokazano na rys.6-2, zaś szczegół montażu sondy odbierającej ciśnienie spod przegrody porowatej dyfuzora na rys.6-3.

Obok zbiornika zainstalowano na 2 stołach nie pokazaną na rys.6-1 stację miareczkową dla wykonywania na miejscu niezbędnych w trakcie badań oznaczeń.

Jak już wspomniano w badaniach nad działaniem dyfuzorów zastosowano jako układ odniesienia 2 oryginalne dyfuzory HKL 210 firmy NOKIA A.B. Ich obudowy wykorzystano również dla konstrukcji doświadczalnych dyfuzorów tkaninowych. Konstrukcję dyfuzorów stanowiących obiekt badań pokazano na rys.6-3. Dwie oryginalne obudowy dyfuzorów HKL 210 /1/ zamontowano na przewodzie z PCV /2/ o średnicy 90 mm i długości 0,8 m z zaślepionymi końcami. Sposób montażu, użyta średnica przewodu z PCV i odległości między dyfuzorami zgodne były z zaleceniami firmy NOKIA dla dyfuzorów HKL 210. W środku odcinka przewodu /2/ wspawano nagwintowany króciec z PCV /3/ o średnicy 32 mm do którego dokręcono za pomocą kształtki redukcyjnej stalowy ocynkowany przewód /4/ o średnicy 50 mm, którego koniec połączony był elastycznymi przewodami z doprowadzeniem sprężonego powietrza. Opisaną konstrukcję ustawiono na dnie zbiornika, w ten sposób, że oś stalowego przewodu /4/ pokrywała się z osią zbiornika, zaś oś poziomego przewodu /2/ z zamontowanymi na nim dyfuzorami znajdowała się w osi zbiornika równolegle do czoła zbiornika. Na rys.6-3 w przekroju pokazano sposób mocowania w obudowie oryginalnego dyska z porowatego polietylenu

o firmowej nazwie NOPOL /5/. Dyfuzory tkaninowe tworzono przez zastąpienie dysku /5/ tkaniną wklejoną pomiędzy 2 uszczelki gumowe o grubości dobranej w ten sposób aby zapewnić szczelność przy dociśnięciu gwintowanym pierścieniem /6/ do obudowy /1/. Jako materiał porowaty dla dyfuzorów tkaninowych stosowano trzy rodzaje tkanin o symbolach PT-48; PT-79 oraz PT-55. Otwór o średnicy 10 mm /7/ w obudowie i przewodzie /2/ służył do doprowadzenia sprężonego powietrza pod przegrodę porowatą dyfuzora. Na rys.6-3 pokazano w przekroju sposób montażu sondy /8/ połączonej z manometrem różnicowym dla pomiaru wysokości ciśnienia pod przegrodę porowatą.

Konstrukcję mieszalnika siatkowego stanowiącego obiekt badań w niniejszej pracy pokazano na rys.6-4. Obudowa mieszalnika /1/ wykonana była z blach aluminiowych umocowanych śrubami do kątowników /4/. Wewnątrz obudowy /1/ mocowano siatki ogrodzeniowe z tworzywa sztucznego o czworokątnych oczkach o wymiarze ok. 2,5 x 2,5 cm /2/. Mieszalnik podzielono na 3 elementy łączone ze sobą odcinkami płaskownika /3/. Każdy z elementów miał długość 0,5 m, z tym że dolny element miał dłuższe od pozostałych kątowniki obudowy, przez co utworzyły się 4 nogi na których ustawiano mieszalniki na dnie zbiornika. Do badań stosowano 2 mieszalniki, które ustawiano nad obudowami dyfuzorów w ten sposób, że osie mieszalników pokrywały się z osiami otworów służących do doprowadzenia sprężonego powietrza /oznaczenie /7/ na rys.6-3/. W badaniach z mieszalnikami stosowano również doprowadzenie powietrza poprzez dyfuzory /bez demontażu przegrody porowatej z obudowy/.

6.3. Sposób realizacji pomiarów i ich zakres

6.3.1. Optyczna ocena działania urządzeń

Optyczną ocenę działania dyfuzorów i mieszalników siatkowych prowadzono wykorzystując okienka ze szkła organicznego zamontowane w zbiorniku. Obejmowała ona: obserwacje dyfuzorów i mieszalników w momencie pojawiania się pierwszych pęcherzyków powietrza w wodzie, ocenę jednorodności i wielkości pęcherzyków sprężonego powietrza, cyrkulację pęcherzyków w zbiorniku. Ponadto obserwowano zmiany charakteru ruchu pęcherzyków i ich wielkości wraz ze wzrostem przepływu sprężonego powietrza. Przy badaniach mieszalników siatkowych przedmiotem obserwacji były zmiany wielkości pęcherzyków w miarę wzrostu rozstawienia siatek.

6.3.2. Pomiary oporów hydraulicznych dyfuzorów

Pomiarów oporów hydraulicznych dyfuzorów przy przepływie sprężonego powietrza przez przegrodę porowatą prowadzono na układzie pomiarowym pokazanym na rys.6-2. Przed przystąpieniem do pomiaru układ pomiarowy odwadniano przez stopniowe włączenie dopływu powietrza pod dyfuzor z małym natężeniem. Powietrze wypierało nagromadzoną w przewodzie łączącym sondę z manometrem różnicowym wodę do butli umieszczonej pod zbiornikiem. Kilkakrotne powtórzenie tego zabiegu połączone z odpowiednim manipulowaniem zaworami umieszczonymi na przewodzie /rys.6-2/ powodowało całkowite opróżnienie układu pomiarowego z wody.

Pomiar oporów hydraulicznych przegrody dyfuzora prowadzono przy 5 napełnieniach zbiornika wodą: 0,12 m; 0,8 m; 1,5 m; 2 m; 2,35 m. Po napełnieniu zbiornika do odpowiedniej wysokości i odwodnieniu opisanym powyżej sposobem układu pomiarowego przystępowano do pomiaru. Za pomocą reduktora ciśnienia przy sprężarce ustawiono kolejno wzrastające przepływy sprężonego powietrza przez dyfuzor

rejestrując odpowiadające im przyrosty różnic poziomów cieczy w manometrze różnicowym. Badanie prowadzono w zakresie przepływów powietrza od 0,65 m^3/h do 20 m^3/h wykorzystując pełny zakres mierniczy jednego /mniejszego/ a następnie drugiego retametru. Odczytów na manometrze dokonywano po ustaleniu przepływu powietrza i uspokojeniu się zwierciadeł cieczy w rurze manometru. Jako cieczy manometrycznej użyto czterochlorku węgla o gęstości 1590 kg/m^3. Wyniki pomiarów rejestrowano w notatniku pomiarowym. Badaniu oporów hydraulicznych poddano wszystkie analizowane materiały tj. dyski z polietylenu Nopol, i tkaniny PT-48, PT-79 i PT-55.

W początkowej fazie badań dla każdego napełnienia zbiornika wykonywano 5 serii pomiarów, po wstępnej analizie wyników ograniczono ilość serii pomiarowych.

6.3.3. Pomiary kinetyki natleniania

Pomiary kinetyki natleniania zrealizowano stosując powszechnie przyjętą metodę określania efektywności natleniania tzw. OC /oxygenation capacity/. Metoda ta została zadaptowana w kraju przez W.Królikowskiego i Suchecką [41] z Instytutu Gospodarki Komunalnej /ob. IKŚ/.

Istotą metody jest pomiar szybkości wprowadzania tlenu do wody wstępnie odtlenionej. Realizacja pomiaru polega na oznaczaniu zawartości tlenu w wodzie wodociągowej wstępnie odtlenionej siarczynem sodowym w obecności soli kobaltu jako katalizatora w czasie napowietrzania.

Przed przystąpieniem do pomiarów w wodzie wodociągowej którą napełniony był zbiornik oznaczono zawartość tlenu pobierając 2 próbki z różnych poziomów. Na podstawie oznaczonej zawartości

tlenu wyliczano niezbędną dla odtlenienia wody masę siarczynu sodowego. Używano przy tym zarówno produktu czystego jak i technicznego siarczynu sodowego. Przed wprowadzeniem do wody odważonej masy siarczynu sodowego dodawano do wody roztworu wodnego chlorku kobaltu w ilości dobranej tak, aby zawartość jonu CO^{++} w odtlenionej wodzie wynosiła 1 mg/l. Po zakończeniu dawkowania siarczynu sodowego zawartość zbiornika intensywnie mieszano mieszadłem. Po upływie 5 ÷ 10 minut od zakończenia mieszania pobierano z 2 punktów zbiornika próbki wody i oznaczono w nich zawartość tlenu. Jeżeli w obu próbkach zawartości te były bliskie siebie i zawarte w przedziale 0,3 ÷ 1,2 mg/l odtlenianie uznawano za wystarczające. Po odtlenieniu mierzono i rejestrowano temperaturę wody termometrem o zakresie mierniczym 0 ÷ 50 deg C skalowanym z dokładnością do 0,2 deg C. Następnie rozpoczynano napowietrzanie włączając dopływ powietrza do badanego urządzenia, przy czym tracono od 3 do 5 sekund na uzyskanie wymaganego przepływu sprężonego powietrza. W momencie osiągnięcia wymaganego przepływu sprężonego powietrza włączono stoper. W ustalonych odstępach czasu pobierano ze wszystkich 6 punktów próbki wody do butelek o pojemności 250 ml /zawory czerpalne na zakończeniu przewodów doprowadzających wodę z punktów poboru do butelek były cały czas otwarte, zaś na końce zaworów naciągnięto wężyki gumowe sięgające dna butelek/. Próbki wody natychmiast utrwalono i po zakończeniu serii oznaczono w nich na miejscu stężenie tlenu metodą Winklera według metodyki Hermanowicza i innych [42] z tym że dla zwiększenia dokładności oznaczeń stosowano 0,01n tiosiarczan sodowy zamiast 0,025n.

Badanie kinetyki natleniania prowadzono przy ustalonych następujących przepływach sprężonego powietrza przez urządzenia: 2 m^3/h; 4 m^3/h; 8 m^3/h i 12 m^3/h.

Dyfuzory firmy Nokia i dyfuzory z tkanin PT-48 i PT-79 badano przy 4 napełnieniach zbiornika: 0,8 m; 1,5 m; 2 m; 2,35 m. Mieszalniki siatkowe badano przy napełnieniach zbiornika 1 m; 1,5 m i 2 m przy czym przy napełnieniu 2 m zrealizowano również badania ze zmienną wysokością mieszalnika wynoszącą 0,5; 1 ; 1,5 m. Badania te powtórzono dla zmiennego rozstawu siatek w mieszalniku przy rozstawach 1,5 cm; 4,5 cm; 9 cm; 18 cm /wyrywkowo/ oraz bez siatek z pustą obudową mieszalnika. Ponadto badano układy złożone z dyfuzorów HKL 210 i tkaninowego z tkaniną PT-48 i mieszalników siatkowych z rozstawem siatek 1,5 cm i z pustą obudową mieszalnika. Łącznie wykonano 232 serie pomiarowe. Wyniki pomiarów rejestrowano w notatniku pomiarowym.

7. Wyniki badań i ich interpretacja

7.1. Opis obserwacji optycznych

7.1.1. Obserwacje procesu rozdziału powietrza za pomocą dyfuzorów

Obserwacje procesu rozdziału powietrza za pomocą dyfuzorów prowadzono z wykorzystaniem wzierników w zbiorniku opisanych w p.6.

Obserwacje prowadzono od momentu włączenia dopływu sprężonego powietrza do układu dyfuzorów do chwili wyłączenia dopływu powietrza przy jego wzrastającym przepływie. Od chwili włączenia dopływu sprężonego powietrza do momentu pojawienia się pierwszych pęcherzyków nad powierzchnią dyfuzora upływał czas związany z wypieraniem z układu wody nagromadzonej w trakcie przerw w napowietrzaniu. Wypieraniu wody towarzyszyło sprężanie się powietrza w przewodzie dopływowym w stopniu znacznie większym aniżeli wynikający z poziomu napełnienia zbiornika i oporu dyfuzorów.

Obserwacje manometru mechanicznego z rurką Bourdona wskazują że osiągana w tym czasie wysokość sprężu powietrza była ok. 2 razy wyższa od sumy wysokości napełnienia zbiornika i oporu dyfuzorów. Próby gwałtownego wypierania wody za pomocą dużego przepływu sprężonego powietrza powodowały awarie przewodów doprowadzających powietrze do dyfuzorów. Wskazuje to na konieczność stopniowego wypierania wody przy uruchamianiu głębokiego napowietrzania komór osadu czynnego, oraz na konieczność przewidywania na etapie doboru urządzeń do sprężania powietrza odpowiednich rezerw w wysokości sprężu. Z chwilą pojawienia się pierwszych pęcherzyków sprężonego powietrza nad powierzchnią dyfuzora wskazania w/wym. manometru spadały do wysokości odpowiadającej sumie wysokości napełnienia zbiornika i oporu dyfuzorów. Przy małych intensywnościach napowietrzania /do 2 $m^3/h\ m^2$/ powierzchnia przegród porowatych dyfuzorów pracowała bardzo nierównomiernie, pęcherzyki powietrza po oderwaniu od przegrody unosiły się prawie prostoliniowo do zwierciadła cieczy. Przy intensywnościach napowietrzania powyżej 2 $m^3/h\ m^2$ powierzchnia dyfuzorów zaczynała pracować równomiernie, zaś pęcherzyki unosiły się swobodnie do zwierciadła cieczy nie łącząc się ze sobą. Zmiana charakteru przepływu pęcherzyków następowała przy intensywności napowietrzania ok. 13 do 16 $m^3/h\ m^2$, zależnie od rodzaju dyfuzora i napełnienia zbiornika. Istotą zmiany charakteru pęcherzyków powietrza było łączenie się części z nich w większe nieregularne pęcherze tuż przy powierzchni dyfuzora. Zmianie charakteru ruchu pęcherzyków towarzyszyły chwilowe wzrosty ciśnień w układzie do wysokości 2 - 2,5 krotnie przewyższającej wysokość wynikającą z sumy napełnienia zbiornika i oporów dyfuzora.

Dalsze zwiększanie przepływu nie powodowało już zmiany charakteru ruchu pęcherzyków w zbiorniku. Przy intensywnościach napowie-

trzania do 2 $m^3/h\ m^2$ nie obserwowano cyrkulacji pęcherzyków powietrza w zbiorniku. W zakresie intensywności napowietrzania od 2 do 13-16 $m^3/h\ m^2$ obserwowano cyrkulację pęcherzyków, z których część nie dochodziła do powierzchni zwierciadła cieczy w zbiorniku lecz zawracała do wnętrza zbiornika. Obserwowano również występowanie wtórnie sformowanych bardzo małych pęcherzyków w górnej strefie cieczy w zbiorniku. Po zmianie charakteru ruchu pęcherzyków, przy intensywności napowietrzania powyżej 13 ÷ 16 $m^3/h\ m^2$ obserwowano duże zróżnicowanie wielkości pęcherzyków, znaczny wzrost cyrkulacji i dużą ilość wtórnie sformowanych małych pęcherzyków w całym zbiorniku.
Spośród badanych dyfuzorów najbardziej równomierne pęcherzyki formowały się przy przepływie powietrza przez porowaty polietylen Nopol. Osiągane wielkości pęcherzyków wynosiły od 2÷6 mm. Tkaniny powodowały tworzenie się pęcherzyków bardziej nierównomiernych o wielkościach zbliżonych do wielkości przy stosowaniu dyfuzorów firmy Nokia.
Zastosowanie pustej obudowy mieszalnika przy rozdziale powietrza dyfuzorami powodowało znaczne polepszenie cyrkulacji pęcherzyków powietrza.

7.1.2. Obserwacje procesu przepływu powietrza przy zastosowaniu mieszalników.

Obserwacje procesu przepływu powietrza w układzie z zastosowaniem mieszalników siatkowych prowadzono podobnie jak dla dyfuzorów od momentu włączenia do wyłączenia dopływu sprężonego powietrza. Z uwagi na fakt, że doprowadzenie powietrza pod mieszalnik następowało otworem o średnicy 10 mm wypieranie wody z przewodów doprowadzających sprężone powietrze następowało dużo

szybciej i przy mniejszej wysokości sprężu, aniżeli w układzie z dyfuzorami. Powietrze dopływało pod mieszalnik dużymi pęcherzykami przy czym przy intensywności napowietrzania do 10 m^3/hm^2 formowały się swobodnie unoszące się pęcherze, zaś przy większych przepływach powietrza z otworu wypływał łańcuch łączących się ze sobą pęcherzy powietrza. W układach porównawczych z pustą obudową mieszalnika do powierzchni zwierciadła cieczy w zbiorniku docierały duże pęcherze o rozmiarach kilku do kilkunastu centymetrów, które po rozbiciu formowały szereg drobnych pęcherzyków cyrkulujących ku dołowi zbiornika na zewnątrz obudowy. Ten sposób cyrkulacji pęcherzyków był charakterystyczny dla wszystkich układów z mieszalnikami. W zależności od rozstawu siatek w mieszalniku formowały się rozmaite wielkości pęcherzyków sprężonego powietrza. Już przy 0,5 m wysokości mieszalnika przy rozstawach siatek 1,5 i 4,5 cm formujące się pęcherzyki powietrza przypominały kształtem, wielkością i sposobem cyrkulacji pęcherzyki formujące się przy użyciu dyfuzora Nokia. Przy rozstawie siatek 9 cm formowały się większe pęcherzyki których wielkość wynosiła od 6 ÷ 12 mm, zaś przy rozstawie siatek 18 cm przy małych intensywnościach napowietrzania formowały się pęcherzyki o wielkości od 1 cm do kilku cm, zaś przy dużych intensywnościach napowietrzania prawie niedostrzegalny był wpływ siatek na formowanie pęcherzyków, charakter przepływu powietrza przypominał układ z pustą obudową mieszalnika.

Podobnie jak w układach z dyfuzorami podwyższenie intensywności napowietrzania powodowało polepszenie cyrkulacji pęcherzyków w zbiorniku.

7.2. Wyniki badań nad oporami przy przepływie sprężonego powietrza przez materiał porowaty dyfuzorów i ich interpretacja

Badania nad oporami przy przepływie sprężonego powietrza przez dyfuzory zrealizowano dla porowatego polietylenu Nopol, tkaniny PT-48 i tkaniny PT-79, zaś w wyniku wstępnego badania zdyskwalifikowano tkaninę PT-55 i nie prowadzono z jej zastosowaniem dalszych badań. Powodem takiego postępowania było stwierdzenie w trakcie wstępnych testów, że opory przy przepływie sprężonego powietrza przez tę tkaninę przewyższają opory w pozostałych tkaninach ok. 3 krotnie, przy czym przy większych intensywnościach napowietrzania następowało wyrywanie tkaniny z obudowy co uniemożliwiało kontynuację pomiarów.

Wyniki pomiarów oporów przy przepływie sprężonego powietrza przez badane materiały porowate dyfuzorów zawarte są w notatniku badawczym znajdującym się w archiwum niniejszej pracy [43], zaś wstępnie zinterpretowane średnie wyniki z badań zawarte są w tablicach 7-1 do 7-3. Wyniki zawarte w tych tablicach zinterpretowano w formie krzywych wyinterpolowanych graficznie na rys.7-1 do 7-5; 7-7 do 7-11 i 7-13 ÷ 7-17, zaś rys.7-6; 7-12 i 7-18 zawierają zbiorcze charakterystyki zależności wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla różnych napełnień zbiornika.

7.3. Wyniki badań nad efektywnością natleniania i ich interpretacja

Efektywność natleniania badanych układów oceniono drogą pomiaru kinetyki natleniania /OC/, opis sposobu realizacji pomiarów zawiera p.6. Wyniki pomiarów wielkości umożliwiających obliczenie kinetyki natleniania zawarte są w notatniku badawczym

znajdującym się w archiwum niniejszej pracy [43].

Wyniki te zinterpretowano stosując wzory [44]:

$$OC = 2{,}303 \cdot 11{,}33 \cdot \frac{1}{t_x} \sqrt{\frac{k_{10}}{k_T}} \cdot \lg \frac{C_s - C_o}{C_s - C_x} \qquad 7\text{-}1$$

gdzie:

OC - efektywność natleniania, gO_2/m^3h

2,303 - mnożnik przeliczenia logarytmu naturalnego na logarytm dziesiętny

11,33 - zawartość tlenu w cieczy w stanie nasycenia przy temp. 10^oC i ciśnieniu 760 mm Hg, dla czystej wody wodociągowej, g/m^3

t_x - czas natleniania, h

k_{10}, k_T - stałe dyfuzji tlenu do cieczy przy temperaturze 10^oC i przy temperaturze T, przy której prowadzono natlenianie; wartości wyrażenia k_{10}/k_T zawierają tablice [41], [44]

C_s - zawartość tlenu w cieczy w stanie nasycenia w warunkach pomiaru, g/m^3

C_o - początkowa zawartość tlenu w cieczy, w chwili rozpoczynania natleniania, g/m^3

C_x - zawartość tlenu w cieczy po natlenianiu w ciągu czasu t_x, g/m^3

oraz:

$$K = \frac{OC \cdot V}{H \cdot Q_p} \qquad 7\text{-}2$$

gdzie:

K - wskaźnik wykorzystania tlenu z 1 m^3 powietrza wprowadzonego do zbiornika na metr głębokości zanurzenia dyfuzora, gO_2/m^3 m

OC - wg wzoru 7-1, gO_2/m^3h

V - objętość cieczy w zbiorniku, m^3

H - głębokość zanurzenia dyfuzora pod zwierciadło cieczy, przyjęto że $H = H_{ZB}$ /napełnienie zbiornika/, m

Q_p - przepływ powietrza, m^3/h

Obliczenie wartości OC i K prowadzono w ramach serii doświadczalnej, obejmującej 1 badany układ kolejno dla każdego punktu poboru prób wody ze zbiornika, a następnie uśredniano otrzymane wyniki. Ze względu na dużą liczbę wyników /232 serie pomiarów/ obliczenia prowadzono za pomocą minikomputera WANG 2200 programem opracowanym w języku BASIC. Program ten nie ma w chwili obecnej charakteru uniwersalnego lecz został opracowany specjalnie dla potrzeb niniejszej pracy, stąd też nie został przytoczony a umieszczony w archiwum pracy [43]. Przykładowo pokazano w tablicy 7-4 wydruk wyników obliczeń dla 1 serii pomiarowej. Pozostałe wydruki umieszczono w archiwum [43]. Średnie wyniki efektywności natleniania dla badanych układów zestawiono w tablicach 7-5 do 7-14. Zestaw wartości w tablicach 7-5 do 7-8 włącznie zawiera wyniki badań nad efektywnością natleniania i wskaźniki wykorzystania tlenu dla dyfuzorów. Zestaw wartości w tablicach 7-9 do 7-14 włącznie zawiera wyniki badań nad efektywnością natleniania i wskaźniki wykorzystania tlenu dla układów z mieszalnikami siatkowymi. Dane zawarte w wymienionych tablicach stanowiły podstawę do graficznej interpretacji zależności efektywności natleniania mierzonej wartością OC i wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania dla badanych układów. Graficzną interpretację tych zależności zawierają rysunki 7-19 do 7-35 włącznie. Rysunki od 7-19 do 7-26 włącznie zawierają interpretację wyników badań nad dyfuzorami, zaś rysunki od 7-27 do 7-35 włącznie wyniki badań układów z mieszalnikami siatkowymi.

Dla ustalenia wpływu istnienia siatek w mieszalniku siatkowym na szybkość wymiany tlenu wyprowadzoną w ramach rozważań teoretycznych w p.4.3. obliczono na podstawie danych zawartych w tablicy 7-9 wielkość wzrostu szybkości wymiany tlenu ΔR ustaloną w oparciu o wzory /4-1/ do /4-5/ następująco:

$$\Delta R = OC_m \cdot V - OC_o \cdot V = \left(OC_m - OC_o\right) V \qquad 7\text{-}3$$

gdzie:

ΔR - wzrost szybkości wymiany tlenu wynikający z wprowadzenia dodatkowego mieszania, gO_2/h

OC_m - efektywność natleniania układu z mieszalnikiem o rozstawie siatek równym m, gO_2/m^3h, /wg tabl.7-9/

OC_o - efektywność natleniania układu z pustą obudową mieszalnika m = o, gO_2/m^3h, /wg tabl.7-9/

V - objętość wody w zbiorniku, m^3

Obliczenie przeprowadzono przykładowo dla układu napełnienia zbiornika H_{ZB} = 2 m i wysokości mieszalnika równej H_M = 1,5 m. Wyniki obliczeń zawiera tablica 7-15, zaś ich graficzną interpretację rys.7-36.

7.4. Wskaźniki efektywności energetycznej operacji natleniania dyfuzorami i mieszalnikami siatkowymi.

Wskaźnikiem efektywności energetycznej operacji natleniania jest tak zwana „ekonomia natleniania" lub „ekonomika natleniania" oznaczona zazwyczaj symbolem E i wyrażająca ilość tlenu zaabsorbowanego w cieczy na jednostkę energii zużytej dla osiągnięcia tego efektu [44]. Ponieważ terminy „ekonomia natleniania" lub „ekonomika natleniania" mogą budzić pewne zastrzeżenia [45] w ramach niniejszej pracy będzie używany termin

„efektywność energetyczna natleniania", przy czym rozumiany będzie w sposób zdefiniowany ogólnie powyżej. Rozróżnia się efektywność energetyczną natleniania brutto przy wyznaczaniu której uwzględnia się wszystkie straty energii poniesione w trakcie operacji natleniania tj. sprawność silników, przekładni, straty ciśnienia w przewodach tłocznych itd., oraz efektywność energetyczną netto przy wyznaczaniu której zakłada się 100% sprawność wszystkich urządzeń i pomija się straty ciśnienia w przewodach tłocznych. W praktyce projektowej istotne znaczenie ma efektywność energetyczna natleniania brutto, zaś dla badań w skali laboratoryjnej lub ułamkowo-technicznej, gdzie zazwyczaj używa się urządzenia do sprężania powietrza o znacznie większej od rzeczywistości potrzebnej mocy i obarcza się przewody tłoczne aparaturą pomiarową stwarzającą dodatkowe opory wyznacza się zazwyczaj efektywność energetyczną natleniania netto. Ponieważ badania w ramach niniejszej pracy zrealizowano w skali ułamkowo-technicznej podstawą oceny efektywności energetycznej operacji natleniania będą wartości netto wskaźnika określonego wzorem:

$$E = \frac{OC \cdot V}{N} \cdot 10^{-3} \qquad 7\text{-}4$$

gdzie:

E - wskaźnik efektywności energetycznej operacji natleniania, kg O_2/kWh

OC - efektywność natleniania określona wzorem /7-1/, gO_2/m^3h

V - objętość wody poddawanej natlenianiu, m^3

N - moc netto niezbędna dla uzyskania danej efektywności natleniania, kW

Moc netto niezbędną dla uzyskania danej efektywności natleniania można wyliczyć dwoma sposobami.

Pierwszy z nich oparty na założeniu, że gaz rozprężający się w komorze napowietrzania ulegając przemianie termodynamicznej wykonuje pracę wprost proporcjonalną do energii włożonej w jego sprężanie, został użyty między innymi przez Orłowskiego [22] i Królikowskiego [45]. Obaj badacze użyli ogólnego wzoru na pracę techniczną przy przemianie politropowej w postaci:

$$L = \frac{n}{n-1} p_1 \cdot V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \qquad 7\text{-}5$$

gdzie:

L - praca techniczna gazu, W

n - wykładnik politropy

p_1, p_2 - początkowe i końcowe ciśnienie gazu, $\frac{N}{m^2}$

V_1 - początkowa objętość strumienia gazu, m^3/s

Przy stosowaniu tego wzoru Orłowskij [22] założył przemianę adiabatyczną przy n = k = 1,4 zaś W.Królikowski [45] przemianę politropową przy n = 1.25.

Prezentowany sposób obliczania mocy może być przyjęty pod warunkiem przyjęcia dodatkowego założenia nie uwypuklonego w cytowanych pracach obu badaczy, zgodnie z którym pomija się fakt ubytku masy gazu w pęcherzykach w czasie przemiany. Założenie to pozostaje co prawda w jaskrawej sprzeczności z istotą operacji natleniania, lecz można je dopuścić przy uwzględnieniu faktu, że tlen jest gazem trudno rozpuszczalnym w wodzie i błąd w obliczeniu mocy wynikający ze zmiany masy pęcherzyków jest niewielki.

Drugi sposób obliczania mocy netto niezbędnej dla uzyskania danego efektu natleniania polega na użyciu wzoru na przybliżoną

moc netto dla wentylatorów [46]. Ten sposób podejścia został zaprezentowany w pracy [44]. Opiera się on na założeniu, że gaz znajdujący się pod przegrodą porowatą ma do pokonania pewne przeciwciśnienie. Moc można wyliczyć ze wzoru:

$$N = \frac{1000 \cdot Q_p \cdot \Delta h}{3600 \cdot 102} \qquad 7\text{-}6$$

gdzie:

N - moc netto, kW

Q_p - natężenie przepływu powietrza, m^3/h

Δh - wysokość przeciwciśnienia, m H_2O

Dla wygody obliczeń wzór ten można przedstawić następująco:

$$N = 2{,}725 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta h \cdot Q_p \quad kW \qquad 7\text{-}7$$

gdzie:

oznaczenia jak poprzednio.

Wzór ten może być stosowany przy założeniu, że wielkość przeciwciśnienia, które musi pokonać gaz nie jest zbyt duża w porównaniu z wysokością ciśnienia barometrycznego, co ma miejsce w badaniach zrealizowanych w ramach niniejszej pracy. Porównanie mocy obliczanych wzorami /7-7/ i odpowiednio przekształconym /7-5/ [43], doprowadziło do stwierdzenia, że wartości mocy różnią się od siebie o 1 ÷ 10% w zakresie $\Delta h = 0{,}5 \div 3$ m H_2O, przy czym najwyższe wartości mocy otrzymuje się ze wzoru /7-7/ zaś najniższe ze wzoru /7-5/ przy założeniu przemiany politropowej. Wobec takiego wyniku porównań przyjęto ostatecznie dla obliczania wskaźnika E wzorem /7-4/ wzór /7-7/ do obliczania mocy netto. Wyniki obliczeń mocy netto zawierają tablice 7-16 /dla dyfuzorów/ i 7-17 /dla mieszalników/. Przy obliczaniu mocy dla dyfuzorów wstawiano do wzoru /7-7/ Δh ustalone w p. 7.1 , zaś dla mieszalników siatkowych założono, że $\Delta h = H_{ZB}$ tj. pominięto opory przy przepływie gazu przez otwór o średnicy

10 mm, którym powietrze docierało pod mieszalnik. To ostatnie uproszczenie opiera się na obserwacjach wysokości ciśnienia odczytanego na manometrze mechanicznym w badaniach nad działaniem mieszalników siatkowych, w trakcie których stwierdzono, że jedynie dla maksymalnych natężeń przepływu powietrza wysokość ciśnienia bardzo nieznacznie odbiegała od wysokości wynikającej z napełnienia zbiornika.

Zestawienie obliczonych wzorem /7-4/ wartości wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E zawierają tablice 7-18 do 7-22. Zestaw wartości E w tablicach 7-18 i 7-19 zawiera dane dotyczące efektywności energetycznej natleniania dyfuzorami, zaś tablice 7-20 do 7-22 włącznie, dane dotyczące efektywności energetycznej natleniania w układach z mieszalnikami siatkowymi. Wielkości zawarte w wymienionych tablicach zinterpretowano graficznie na rys.7-37 do 7-41, przy czym rysunki 7-37 do 7-40 włącznie obejmują dyfuzory, zaś rys. 7-41 do :-43 - układy z mieszalnikami siatkowymi.

8. Analiza wyników, porównanie badanych układów i wnioski z badań

8.1. Analiza wyników badań nad dyfuzorami tkaninowymi

Podstawą niniejszej analizy są zinterpretowane wyniki badań zamieszczone w p.7 niniejszej pracy. Analiza wyników badań oporu dyfuzorów przy przepływie powietrza /tabl. 7-1 do 7-3 i rys.7-1 do 7-18/ pozwala stwierdzić, że opory badanych dyfuzorów rosną ze wzrostem intensywności napowietrzania. Wysokość oporów zwilżonych dyfuzorów wynosi od 0,2 do 0,5 m H_2O przy intensywności napowietrzania od 1 do 20 $m^3/h\ m^2$. Krzywe zależności wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla

dyfuzora Nokia i tkaninowego PT-79 mają podobne szybko rosnące przebiegi, natomiast dyfuzor z tkaniną PT-48 charakteryzuje płaska krzywa o mniejszej rozpiętości wysokości oporów od 0,22 do 0,32 m H_2O. Analiza wykresów na rys.7-6, 7-12 i 7-18 pozwala stwierdzić, że różnica między charakterystyką oporów dyfuzorów przy dowolnym napełnieniu zbiornika i charakterystyką oporów zwilżonych dyfuzorów nie równa się geometrycznej wysokości napełnienia zbiornika, lecz w wyniku odejmowania krzywych otrzymuje się nieco niższą wartość. Prawidłowość tę można wyjaśnić powstawaniem nad dyfuzorem słupa mieszaniny wodno-powietrznej o mniejszej gęstości od gęstości otaczającej go cieczy, a co zatem idzie wytworzeniem dodatkowego „ciągu" w masie cieczy co powoduje obniżenie wysokości oporów. Otrzymywana różnica w wartościach oporów stanowi pośrednią charakterystykę tego zjawiska. Porównanie charakterystyki oporów zwilżonych dyfuzorów Nokia /rys.7-1/ z danymi firmowymi [17] pozwala stwierdzić, że otrzymane wyniki są zgodne z podawanymi przez producenta. Porównanie otrzymanych charakterystyk oporów z danymi dla dyfuzorów produkowanych za granicą /tabl.3-1/ prowadzi do wniosku, że badane tkaniny nie odbiegają pod względem wysokości oporów od wszystkich innych dyfuzorów. Analiza danych dla tkanin radzieckich /rys.4-1/ i krajowych dodatkowo potwierdza poprzednie stwierdzenia.

Za najlepszą z badanych przy porównaniach charakterystyk oporów należy uznać tkaninę PT-48.

Analiza wyników badań nad efektywnością natleniania /OC/ dyfuzorów /tabl.7-5 do 7-8 i rys.7-19 do 7-26/ pozwala stwierdzić, że efektywność natleniania /OC/ wzrasta wraz ze wzrostem intensywności napowietrzaniach od 2 do 8 $m^3/h\ m^2$, a przy dalszym wzroście intensywności napowietrzania spada lub przyrasta nie-

znacznie. Otrzymywane przy tym wartości OC sięgają 15 do 45 gO_2/m^3h /rys.7-19/ i kształtują się podobnie dla wszystkich badanych materiałów porowatych. Wartości OC wzrastają wraz ze wzrostem napełnienia zbiornika /rys.7-19/ przy czym dla wszystkich napełnień zbiornika wartości OC są najwyższe dla dyfuzorów Nokia, najniższe dla tkaniny PT-79 i pośrednie dla tkaniny PT-48 /rys.7-20/. Umieszczenie w zbiorniku z dyfuzorami pustej obudowy mieszalnika powoduje kilkakrotny wzrost bezwzględnych wartości efektywności natleniania /OC/ do wielkości ponad 100 gO_2/m^3h /rys.7-23 do 7-26/ przy czym najlepsze rezultaty daje użycie obudowy o wysokości H_M = 0,5 m zaś najgorsze użycie obudowy o wysokości H_M = 1,5 m. Umieszczenie w zbiorniku pustej obudowy mieszalnika nie powoduje zmiany relacji pomiędzy charakterystykami efektywności natleniania dla dyfuzorów. Zaobserwowana poprawa wyników efektywności natleniającej dyfuzorów przy ich współpracy z pustą obudową mieszalnika, przy jednoczesnym braku zmian we wzajemnych zależnościach między charakterystykami poszczególnych dyfuzorów uwidacznia eksponowany w literaturze [14], [45] wpływ warunków mieszania w komorze na efektywność procesu natleniania. Spadek efektywności natleniania przy dużych intensywnościach napowietrzania potwierdza teoretyczne rozważania przeprowadzone w p.4 pracy i wyniki badań [38].

Analogiczne do opisanych związków pomiędzy charakterystykami efektywności natleniania zachodzą w wypadku wskaźnika wykorzystania tlenu z powietrza K . Wartość tego wskaźnika wynosi od 2 do 10 gO_2/m^3m przy czym maleje ona wraz ze wzrostem intensywności napowietrzania. Analiza danych na rys.7-21, 22, 25, 26 pozwala stwierdzić, że pozostałe prawidłowości są dokładnie identyczne jak przy OC. Wprowadzenie do zbiornika pustej obudowy mieszalnika powoduje wzrost wartości K w granicach 3 do 18 gO_2/m^3m .

Porównanie charakterystyki efektywności natleniania dyfuzorów Nokia z danymi firmowymi [17] pozwala stwierdzić przesunięcie charakterystyki która według badań zawiera się w granicach /OC/ 15 do 100 gO_2/m^3h /zależnie od warunków mieszania/ zaś według danych firmowych wynosi od 90 do 150 gO_2/m^3h. Porównanie charakterystyk efektywności natleniania /OC/ badanych tkanin z danymi dla innych dyfuzorów /tabl.3-1/ pozwala stwierdzić, że wartości OC dla tkanin układają się w dolnej połowie zakresu wartości podawanych dla dyfuzorów produkcji zagranicznej.

Za lepszą z badanych tkanin w świetle porównania charakterystyk efektywności natleniania należy uznać tkaniny PT-48. Osiągane za jej pomocą wartości OC zgodne są z postulowanymi wartościami OC dla komór napowietrzania z głębokim wprowadzeniem sprężonego powietrza wyprowadzonymi w pracy [34].

Analiza energochłonności badanych dyfuzorów /tabl.7-17 i 7-18 i rys.7-37 do 7-40/ wskazuje, że wartość wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E zawarta jest w granicach 0,8 do 3,5 kgO_2/kWh przy niekorzystnych warunkach mieszania i wynosi E = 1 do 6 kgO_2/kWh przy korzystnych warunkach mieszania w zbiorniku /użycie pustej obudowy mieszalnika/, przy czym wartość wskaźnika E maleje ze wzrostem intensywności napowietrzania. Wyniki szczegółowej analizy danych zawartych w tablicach 7-17 i 7-18 i na rysunkach 7-37 do 7-40, jak również porównania z danymi zagranicznymi wskazują, że wyprowadzone dla OC i K prawidłowości są słuszne i dla wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E.

Podobnie jak i w poprzednich wypadkach za lepszą należy uznać tkaninę PT-48.

8.2. Analiza wyników badań nad mieszalnikami siatkowymi

Analiza wyników badań nad efektywnością natleniania /OC/ układów z mieszalnikami siatkowymi /tabl.7-9 do 7-14 i rys.

7-27 do 7-35/ pozwala stwierdzić, że osiągane efektywności natleniania wynoszą od 10 do 120 gO_2/m^3h przy czym OC wzrasta ze wzrostem intensywności napowietrzania do I = 2 ÷ 8 m^3/h, zaś przy wyższych intensywnościach napowietrzania wartość OC spada lub tylko nieznacznie wzrasta, podobnie jak w wypadku dyfuzorów tkaninowych. Widoczny jest wyraźny wpływ rozstawu siatek w mieszalniku na wartość efektywności natleniania. Wartość OC wzrasta wraz z zagęszczeniem siatek dla rozstawów siatek od 9 cm do 1,5 cm. Układy z mieszalnikami o rozstawie siatek m = 18 cm cechuje wartość OC wyższa niż dla układu porównawczego z pustą obudową mieszalnika, lecz widać wyraźne pogorszenie efektywności natleniania. We wszystkich badanych układach efektywność natleniania /OC/ jest najniższa dla pustej obudowy mieszalnika, najwyższa dla mieszalnika z siatkami rozstawionymi co 1,5 cm, pozostałe wartości OC dla innych rozstawień siatek układają się pośrednio. Podobnie,jak wynika z danych w tablicy 7-15 i rys.7-36, układa się przyrost szybkości wymiany tlenu z tytułu dodatkowego mieszania - jest on najwyższy dla rozstawu siatek 1,5 cm zaś najniższy dla rozstawu siatek 18 cm. Potwierdza to poprawność teoretycznych założeń konstrukcji mieszalników siatkowych zawartych w p.4.3. Zależności przedstawione na rysunku 7-36 wskazują również wyraźnie na fakt istnienia optymalnej intensywności napowietrzania - jak wynika z rysunku oraz danych zawartych w tablicy 7-15 przyrost szybkości wymiany tlenu może przyjmować również wartości ujemne, co oznacza że przy przekroczeniu optymalnej intensywności napowietrzania szybkość wymiany tlenu z cieczą maleje, a zatem mechaniczne podnoszenie intensywności napowietrzania nie prowadzi do polepszenia efektu natleniania. Wniosek ten stanowi również potwierdzenie wywodu teoretycznego.

Analiza wpływu wysokości mieszalnika na efektywność natleniania wskazuje, że efektywność natleniania rośnie wraz ze wzrostem wysokości mieszalnika, napełnienie zbiornika ma przy tym drugorzędne znaczenie. Analizowane zależności pozwalają stwierdzić, że efektywność działania wzrasta w miarę zmniejszania rozstawu siatek, przy czym większemu rozstawowi siatek musi towarzyszyć wzrost wysokości mieszalnika.

Interesujące wyniki daje analiza sposobu wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika. Wstępne rozdrobnienie sprężonego powietrza przez użycie dyfuzora Nokia powoduje podwyższenie efektywności natleniania do 150 gO_2/m^3h, natomiast użycie do wstępnego rozdrobnienia powietrza dyfuzora z tkaniną PT-48 powoduje spadek efektywności natleniania, zaś użycie charakterystycznego dla mieszalników wprowadzania powietrza za pomocą otworu w przewodzie doprowadzającym sprężone powietrze powoduje otrzymanie pośrednich w stosunku do wymienionych wartości i efektywności natleniania. Taki wynik badań daje niejednoznaczny rezultat w świetle rozważań dotyczących wpływu wielkości pęcherzyków i mieszania na efektywność procesu natleniania przeprowadzonych w p.4.3. Zgodnie z ustaleniami teoretycznymi należałoby oczekiwać wyniku badań zgodnie z którym wstępne rozdrobnienie powietrza albo nie zmieni ostatecznego wyniku efektywności natleniania /jeżeli warunki mieszania w zbiorniku byłyby optymalne/, albo w każdym wypadku współpracy mieszalnika z dyfuzorem efektywność natleniania wzrośnie. Z tego punktu widzenia należy uznać tę część badań za wymagającą poszerzenia w toku dalszych prac dla sformułowania jednoznacznego rezultatu.

Analiza zależności wartości wskaźnika wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego K wykazuje że waha się on w granicach 2 do 18 gO_2/m^3m przy czym układy porównawcze z pustą obudową

mieszalnika charakteryzują się bardzo małymi wartościami K od 2 do 3 gO_2/m^3m, zaś najwyższe wartości K występują w układach z mieszalnikami o rozstawie siatek m = 1,5 cm. Podobnie jak w wypadku dyfuzorów wartości wskaźników K maleją wraz ze wzrostem intensywności napowietrzania. Analiza innych zależności wskaźnika K wskazuje, że są one analogiczne jak dla efektywności natleniania OC.

Analiza energochłonności procesu natleniania za pomocą mieszalników siatkowych /tabl.7-19 do 7-21 i rysunki 7-41 do 7-43/ wskazuje, że wartość wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E wynosi od 1 do 6 kgO_2/kWh przy czym wartość wskaźnika maleje wraz ze wzrostem intensywności napowietrzania. Inne przebiegi zależności wartości wskaźnika E dla badanych układów z mieszalnikami siatkowymi potwierdzają prawidłowości wyprowadzone przy analizie wyników efektywności natleniania OC.

Otrzymanych w ramach niniejszej pracy wyników badań nad efektywnością działania nie można porównać z danymi dla zagranicznych konstrukcji mieszalników zawartymi w p.3 ponieważ warunki eksperymentu odbiegają w zasadniczy sposób od tych w których były badane zagraniczne konstrukcje mieszalników.

8.3. Porównanie badanych układów

Dla porównania efektywności działania badanych aeratorów wybrano i zestawiono na rys.8-1 i 8-2 charakterystyki najlepszych z badanych układów. Porównanie tych charakterystyk pozwala stwierdzić, że najwyższą efektywnością działania charakteryzują się aeratory z dyfuzorami Nokia zmodyfikowanymi przez dodanie mieszalników siatkowych. Spośród proponowanych nowych konstrukcji aeratorów zdecydowanie lepsze są aeratory bezfil-

trosowe z mieszalnikami siatkowymi o rozstawie siatek 1,5 lub 4,5 cm, natomiast najgorsze wyniki dają aeratory z dyfuzorami tkaninowymi i pustą obudową mieszalnika.

Porównanie możliwości stosowania badanych aeratorów daje preferencje aeratorom bezfiltrosowym z mieszalnikami siatkowymi, gdyż ich możliwości stosowania są najszersze. Oprócz komór osadu czynnego mogą one być użyte przy napowietrzaniu stawów, jezior, w oczyszczalniach ścieków deszczowych itd. Techniczna przewaga aeratorów bezfiltrosowych z mieszalnikami siatkowymi nad pozostałymi badanymi aeratorami polega na tym, że mają one najprostszy z możliwych sposób wprowadzenia sprężonego powietrza do cieczy. Wielkość otworu, którym dopływa do mieszalnika sprężone powietrze praktycznie uniemożliwia jego zatkanie w trakcie postoju aeratora, oraz gwarantuje nieznaczną wysokość strat ciśnienia przy wypływie sprężonego powietrza do mieszalnika.

Dalsze porównanie wybranych najlepszych układów przeprowadzono oceniając je za pomocą wskaźnika efektywności ekonomicznej. Wartość tego wskaźnika oblicza się z ogólnego wzoru [47], [48]:

$$E_1 = \frac{/r + s/ I + K}{W}$$

gdzie:

E_1 - wskaźnik efektywności ekonomicznej wyrażony w zł na jednostkę efektu użytkowego

r - stopa dyskontowa

s - stawka amortyzacyjna

I - nakłady inwestycyjne, zł

K - roczne koszty eksploatacji, zł/a

W - roczny efekt użytkowy

Ze względu na specyficzne warunki eksperymentu, zrealizowanego w skali ułamkowo technicznej wskaźniki efektywności ekonomicznej

obliczono jedynie dla samych aeratorów, pominięto zbiornik, urządzenie do sprężania powietrza i przewody doprowadzające powietrze do aeratorów. Ponieważ badane aeratory stanowiły prototypy wykonane metodą warsztatową przyjęto do rachunku w miejsce całkowitych nakładów inwestycyjnych jedynie koszty materiałów, zaś zamiast całkowitych rocznych kosztów eksploatacyjnych przyjęto całkowite roczne koszty energii. Przy powyższych założeniach ogólny wzór na obliczenie wskaźników efektywności ekonomicznej przebiega postać:

$$E_1 = \frac{/r + s/ K_M + K_E}{W}$$

gdzie:

E_1, r, s, W - jak poprzednio

K_M - koszty materiałów zużytych na wykonanie aeratorów

K_E - roczne koszty energii

Do obliczeń przyjęto wartość stopy dyskontowej r = 0,08 wg [47]. Wartość stawki amortyzacyjnej przyjęto s = 0,085 wg [49] dla urządzeń technicznych do uzdatniania wody i oczyszczania ścieków. Ta wartość stawki odpowiada założeniu, że żywotność aeratora wynosi ok. 9 lat.

Koszty materiałów obliczono posługując się obowiązującymi cennikami dostaw w hurcie na poziomie cen 31.12.1977r. Cenę dyfuzora HKP 210 firmy Nokia ustalono w oparciu o informacje Radcy Handlowego Ambasady Finlandii. Koszty energii elektrycznej ustalono wg cennika 7-Z/76. Przyjęto przy tym cenę 1 zł/kWh jako wypośrodkowaną z działów B i C według których ustalane są zazwyczaj ceny energii elektrycznej dla oczyszczalni ścieków. Efekt użytkowy ustalono jako roczną masę tlenu wprowadzaną przez aeratory do czystej wody. Wyniki obliczeń wskaźników efektywności ekonomicz-

nej zawierają tablice 8-1 do 8-6 oraz rysunki 8-3, 8-4 i 8-5. Porównanie efektywności ekonomicznej badanych układów wyraźnie wykazuje, że układy z samymi mieszalnikami charakteryzują się we wszystkich wypadkach najniższymi wartościami wskaźników efektywności ekonomicznej. W wypadku aeratorów z filtrosami i mieszalnikami, bardziej efektywne ekonomicznie są te w których użyto filtrosów tkaninowych. W badanym zakresie zagłębień od 1 m do 2 m wybrane rozwiązania aeratorów będące przedmiotem niniejszej pracy są pod względem efektywności ekonomicznej korzystniejsze od rozwiązania zagranicznego firmy Nokia, natomiast zastosowanie modernizacji dyfuzora firmy Nokia opracowanym w ramach niniejszej pracy mieszalnikiem siatkowym daje w efekcie przybliżenie poziomu wartości wskaźników efektywności ekonomicznej takiego układu do układów z mieszalnikami siatkowymi. W analizowanym zakresie zagłębień daje się zauważyć dla badanych układów zależność pomiędzy wartościami wskaźników efektywności ekonomicznej, a intensywnością napowietrzania. W miarę wzrostu intensywności napowietrzania od 2 do 8 $m^3/h\ m^2$ Dalszy wzrost intensywności napowietrzania powoduje gwałtowny przyrost wartości wskaźników efektywności ekonomicznej. Wynika stąd, że optymalną z punktu widzenia ekonomicznej efektywności intensywnością napowietrzania jest intensywność 8 $m^3/h\ m^2$ dla wszystkich badanych układów.

8.4. Wnioski z badań

Przeprowadzona analiza wyników badań i porównanie badanych układów ze sobą pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badania wykazały że zastosowanie tkanin produkcji krajowej jako materiału filtrosowego dyfuzorów nie pozwala na osiągnięcie parametrów zapewnianych przez zagraniczne materiały

filtrosowe, spośród których jako bazę do porównań użyto spienionego polietylenu Nopol firmy Nokia.

2. Spośród badanych tkanin: PT-48, PT-55, PT-79 najlepsze wyniki natleniania otrzymuje się stosując dyfuzory z tkaniną PT-48, zaś tkanina PT-55 w ogóle nie nadaje się do stosowania jako materiał filtrosowy.
3. Zastosowanie do filtrosu tkaninowego dodatkowego elementu w postaci mieszalnika siatkowego pozwala na uzyskanie wyższej efektywności działania takiego aeratora od efektywności działania aeratora z samymi dyfuzorami tkaninowymi. W wyniku badań stwierdzono, że mieszalnik siatkowy jako dodatkowy element aeratora z dyfuzorami Nokia pozwala na znaczne podwyższenie efektywności działania tego typu aeratora.
   Wpływ mieszalnika na podwyższenie efektywności działania aeratora wynika głównie z poprawy warunków mieszania i cyrkulacji w całej komorze aeracji, w związku z tym korzystne rezultaty operacji natleniania można uzyskać stosując nawet samą obudowę mieszalnika bez przegród siatkowych.
4. Badane dyfuzory tkaninowe z tkaniny PT-48 charakteryzują się następującymi wartościami parametrów:
   - optymalny zakres intensywności napowietrzania wynosi I = $2 \div 8\ m^3/h\ m^2$
   - wysokość oporów przy przepływie sprężonego powietrza przez zwilżoną tkaninę wynosi: $\Delta h = 0,2 \div 0,3\ m\ H_2O$
   - efektywność natleniania mierzona wartością OC wynosi:
     $15 \div 45\ gO_2/m^3h$ przy niekorzystnych warunkach mieszania
     $20 \div 90\ gO_2/m^3h$ przy korzystnych warunkach mieszania
   - wskaźnik wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego wynosi:
     $2 \div 10\ gO_2/m^3h$ przy niekorzystnych warunkach mieszania

3 ÷ 18 gO_2/m^3h przy korzystnych warunkach mieszania

- wskaźnik efektywności energetycznej operacji natleniania wynosi:

0,8 ÷ 3,5 kgO_2/kWh przy niekorzystnych warunkach mieszania

1 ÷ 6 kgO_2/kWh przy korzystnych warunkach mieszania

5. Wyniki badań potwierdziły teoretyczne założenia koncepcji technologiczno-konstrukcyjnej aeratora z mieszalnikiem siatkowym. Stwierdzono podwyższenie szybkości wymiany tlenu na skutek wprowadzenia dodatkowego mieszania sprzyjającego rozrywaniu się i tworzeniu nowych pęcherzyków powietrza przy natlenianiu. Efektywność działania aeratora bezfiltrosowego z mieszalnikiem siatkowym mierzona wartością OC i wskaźnikiem efektywności energetycznej natleniania E zależna jest od natężenia przepływu sprężonego powietrza przez mieszalnik, rozstawu siatek i wysokości mieszalnika.

Badania nad wpływem rozstawu siatek w mieszalniku siatkowym na efektywność działania aeratora bezfiltrosowego wykazały, że efektywność działania wzrasta w miarę zmniejszania rozstawu siatek, przy czym za zadawalające można uznać wyniki otrzymywane przy rozstawie siatek 4,5 cm. Wysokość mieszalnika i napełnienie zbiornika mają mniejsze znaczenie. Stwierdzono jednak, że większemu rozstawowi siatek towarzyszyć musi wzrost wysokości mieszalnika.

6. Zaproponowane rozwiązanie aeratora bezfiltrosowego z mieszalnikiem siatkowym charakteryzuje się najniższymi wartościami oporów hydraulicznych w stosunku do pozostałych badanych rodzajów aeratorów przy jednocześnie wysokiej wydajności wyrażonej wartością OC. Rozwiązanie to znacznie przewyższa efektywnością działania aerator z dyfuzorem Nokia, aerator

z dyfuzorem tkaninowym i mieszalnikiem a ustępuje jedynie zmodyfikowanemu aeratorowi Nokia z dodatkowym mieszalnikiem siatkowym.

7. Badane aeratory bezfiltrosowe z mieszalnikami siatkowymi charakteryzują się następującymi wartościami parametrów:
   - optymalny zakres intensywności napowietrzania
     $I = 2 \div 8\ m^3/h\ m^2$
   - efektywność natleniania mierzona wartością
     $OC = 10 \div 120\ g\ O_2/m^3h$
   - wskaźnik wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego
     $K = 2 \div 18\ g\ O_2/m^3m$
   - wskaźnik efektywności energetycznej operacji natleniania
     $E = 1 \div 6\ kgO_2/kWh$

   W rozwiązaniu technicznym mieszalniki powinny mieć rozstaw siatek 4,5 cm, wysokość minimalną 1 m, przy czym napełnienie zbiornika powinno być conajmniej 0,5 m większe od wysokości mieszalnika.
8. Efektywność działania proponowanych konstrukcji aeratorów spełnia wymagania wynikające ze specyfiki procesu osadu czynnego, w zakresie intensywności napowietrzania, efektywności natleniania, wykorzystania tlenu i energochłonności operacji natleniania.
9. Porównanie efektywności ekonomicznej wybranych najlepszych z badanych aeratorów wskazują że aeratory z mieszalnikami charakteryzują się we wszystkich wypadkach najniższymi wartościami wskaźników efektywności ekonomicznej. W badanym zakresie zagłębień od 1 do 2 m wybrane rozwiązania aeratorów stanowiących przedmiot pracy są pod względem efektywności ekonomicznej korzystniejsze od rozwiązania zagranicznego

firmy Nokia, natomiast zastosowanie modernizacji dyfuzora firmy Nokia opracowanym w ramach pracy mieszalnikiem siatkowym daje w efekcie przybliżenie wartości wskaźników efektywności ekonomicznej takiego układu do pozostałych rozwiązań.

9. Kierunki dalszych prac nad dyfuzorami tkaninowymi i mieszalnikami siatkowymi

Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania nad efektywnością działania dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych pozwalają stwierdzić, że wdrożenie tych urządzeń do napowietrzania ścieków w procesie osadu czynnego mogłoby zapełnić lukę jaka istnieje w chwili obecnej w zakresie stosowania systemu głębokiego napowietrzania zawartości komór osadu czynnego w kraju. Pełne wdrożenie powyższych urządzeń wymaga jednak realizacji szeregu prac które można ująć w następujących punktach:

1. Opracowanie konstrukcji dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych dostosowanych do seryjnej produkcji uprzemysłowionej.
2. Wykonanie serii prototypów i zastosowanie ich w działającej oczyszczalni ścieków.
3. Zbadanie wpływu współpracy dyfuzorów tkaninowych z mieszalnikami siatkowymi na efektywność napowietrzania.
4. Wdrożenie opracowanych konstrukcji na podstawie wyników badań prowadzonych na działającej oczyszczalni ścieków.
5. Przeprowadzenie analizy rozmaitych możliwości napowietrzania z zastosowaniem mieszalników siatkowych np. w stawach, lagunach oczyszczalniach ścieków deszczowych itd.

10. Podsumowanie i wnioski końcowe

W ramach niniejszej pracy zbadano efektywność działania nowych konstrukcji urządzeń do głębokiego wprowadzenia powietrza do komór napowietrzania w postaci dyfuzorów tkaninowych i mieszalników siatkowych.

Jako bazę porównawczą dla nowych konstrukcji przyjęto aeratory z dyfuzorem fińskiej firmy Nokia szeroko stosowane w Europie, które zbadano w tych samych warunkach.

Proponowane nowe urządzenia do napowietrzania ścieków o głębokim wprowadzeniu sprężonego powietrza cechuje prostota konstrukcji, możliwość wykonania prostymi sposobami z powszechnie dostępnych i tanich materiałów. Upowszechnienie nowych urządzeń daje możliwość stosowania w kraju systemu głębokiego napowietrzania zawartości komór osadu czynnego, co do chwili obecnej było ograniczone koniecznością importu urządzeń do aeracji. Wdrożenie nowych urządzeń do praktyki wymaga wykonania dalszych prac, których ramowy program został sformułowany w ramach niniejszej pracy.

Główne wyniki pracy można zawrzeć w następujących wnioskach:

1. Efektywność działania nowej konstrukcji aeratorów bezfiltrosowych z mieszalnikiem siatkowym mierzona wysokością oporów przy przepływie sprężonego powietrza, efektywnością natleniania, wskaźnikiem wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego i wskaźnikiem efektywności energetycznej natleniania w pełni dorównuje innym konstrukcjom aeratorów oferowanym przez firmy zagraniczne oraz jest zgodna z wymaganiami wynikającymi ze specyfiki procesu osadu czynnego.
2. Zastosowanie tkanin produkcji krajowej jako materiału filtrosowego dyfuzorów nie pozwala na osiągnięcie parametrów zapew-

nianych przez zagraniczne materiały filtrosowe. Efektywność działania dyfuzorów tkaninowych można jednak zwiększyć przez polepszenie warunków mieszania w komorze na drodze zastosowania pustej obudowy mieszalnika.

3. Proponowane nowe konstrukcje urządzeń do napowietrzania cechują się prostotą budowy i łatwością wykonania z powszechnie dostępnych i tanich materiałów i mogą stanowić rozwiązanie konkurencyjne dla urządzeń importowanych z krajów strefy dolarowej.

4. W wypadku dyfuzorów tkaninowych spośród badanych tkanin PT-48 PT-55, PT-79 najwyższą efektywnością działania cechuje się tkanina PT-48 pozwalająca na osiągnięcie następujących parametrów:

   - optymalny zakres intensywności napowietrzania $I = 2 \div 8$ $m^3/h\ m^2$
   - wysokość oporów przy przepływie sprężonego powietrza przez zwilżoną tkaninę wynosi $h = 0,2 \div 0,3$ m H_2O
   - efektywność natleniania mierzona wartością OC wynosi:
     $15 \div 45$ gO_2/m^3h przy niekorzystnych warunkach mieszania
     $20 \div 90$ gO_2/m^3h przy korzystnych warunkach mieszania
   - wskaźnik wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego K wynosi:
     $2 \div 10$ gO_2/m^3m przy niekorzystnych warunkach mieszania
     $3 \div 18$ gO_2/m^3m przy korzystnych warunkach mieszania
   - wskaźnik efektywności energetycznej operacji natleniania E wynosi:
     $0,8 \div 3,5$ kgO_2/kWh przy niekorzystnych warunkach mieszania
     $1 \div 6$ kgO_2/kWh przy korzystnych warunkach mieszania

5. Efektywność działania aeratora bezfiltrosowego z mieszalnikiem siatkowym zależna jest od intensywności napowietrzania,

rozstawu siatek i wysokości mieszalnika. Wartości parametrów osiągane przez te aeratory wynoszą:

- optymalny zakres intensywności napowietrzania
  $I = 2 \div 8\ m^3/h\ m^2$
- efektywność natleniania mierzona wartością OC = 10 ÷ 120 gO_2/m^3h
- wskaźnik wykorzystania tlenu z powietrza atmosferycznego
  $K = 2 \div 18\ gO_2/m^3m$
- wskaźnik efektywności energetycznej natleniania
  $E = 1 \div 6\ kgO_2/kWh$

6. Aeratory bezfiltrosowe z mieszalnikami siatkowymi charakteryzują się najniższymi wskaźnikami efektywności ekonomicznej ze wszystkich badanych układów. Ich efektywność ekonomiczna jest korzystniejsza od rozwiązania zagranicznego firmy Nokia, natomiast zastosowanie modernizacji dyfuzora firmy Nokia opracowanym w ramach niniejszej pracy mieszalnikiem siatkowym daje w efekcie przybliżenie poziomu wartości wskaźników efektywności ekonomicznej takiego układu do pozostałych rozwiązań aeratorów.
7. Za najbardziej atrakcyjne z badanych urządzeń należy uznać aerator bezfiltrosowy z mieszalnikiem siatkowym.
8. Wdrożenie badanych rozwiązań wymaga opracowania ich konstrukcji w formie nadającej się do przemysłowego wykonawstwa i zbadania prototypów w pełnej skali technicznej.

P i ś m i e n n i c t w o

1. Hobler T. Dyfuzyjny ruch masy i absorbery. WNT Warszawa 1976
2. Lewis W.K.; Whitman W.G. Principles of Gas Absorption Journ. Ind. and Eng. Chem. T 16, Nr 12, 1924, s.1215
3. Higbie R. The Rate of Absorption of a Pure Gas into Still Liquid During Short Periods of Exposure. Trans. of the American Institute of Chemical Engineers T 31, 1935, s.365
4. Danckwerts P.V. Significance of Liquid Film Coefficients in Gas Absorption. Journ. of Industrial and Engineering Chemistry T 43, Nr 6, 1951, s.1460
5. Danckwerts F.R.S. Gas - Liquid Reactions. Mc Graw Hill Book. New York 1970
6. Toor H.L., Marchello J.M. Film Penetration Model for Mass and Heat Transfer Journ.Am.Inst.Chem.Eng. T 4, Nr 1, 1958 s.97
7. Dobbins W.E. Mechanism of Gas Absorption by Turbulent Liquids. Advances in Water Pollution Research. T 2 Pergamon Press, London, 1964
8. Ippen A.T., Carver C.E. Basic Factor of Oxygen Transfer in Aeration Systems. Sewage and Ind.Wastes T 26, 1954, s.813
9. Pasveer A. Oxygenation of Water with Air Bubbles. Sewage and Ind.Wastes T.27, Nr 10, 1955, s.1130
10. Eckenfelder W.W. Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water. Journ. San.Eng.Div. SA4, Nr 7, 1959, s.89
11. Bewtra I.K.; Nicholas W.R. Oxygenation from diffused air in aeration tanks I.W.P.C.F. T 36, Nr 10, 1964, s.1195
12. Poon Calvin P.C. Theoretical Concept of Oxygen Transfer in Gas Bubble Aeration System. Water and Sew. Works Ref.Number Nr 11, 1966

13. Hörler A. Beitrag zur Steiggeschwindigkeit und zum Steigwiederstand von Luftblasen in reinem Wasser. C.W.F. T 105, Nr 28, 1964, s.764
14. Baars I.K. Problemy i możliwości oczyszczania ścieków miejskich Ref.w materiałach III Konf.nauk.-tech. Postęp techniczny w dziedzinie oczyszczania ścieków, Katowice 1960
15. Waligórski Z. Podgórniakowa M. Napowietrzanie wody IGK, Studia i Materiały z.44, Warszawa 1972
16. Aeration in Wastewater Treatment. Manual of Practice Nr 5 J.W.P.C.F. cz.I Nr 11, 1969, s.1863, cz.II Nr 12, 1969, s.2026, cz.III Nr 1, 1970, s.51
17. Prospekty firmy OY NOKIA A.B. 1974, 1976
18. Prospekt firmy Flygt 1974
19. Prospekt firmy Degremont 1974
20. Prospekty i materiały firmy Schumacher. Plik, 1959-76
21. Prospekt firmy Activated Sludge Ltd. 1972
22. Orłowskij Z.A. Oczistka stocznych wod w aerotienkach Izd. Min.Kom.Choz. RSFSR, Moskwa 1960
23. Karelin I.A.; Żukow D.D.; Żurow W.N.; Repin B.N. Oczistka proizwodstwiennych stocznych wod w aerotienkach, Strojizdat, Moskwa 1973
24. Chudienko B.M.; Szpirt E.A. Aeratory dla oczistki stocznych wod, Strojizdat, Moskwa 1973
25. Godes I.G., Zezulin D.M., Lenskij B.P. Parolitowyje tubki dla raspriedielienija wozducha w aerotienkach Wodosn. i San.Tech. Nr 6, 1966, s.19
26. Wenda R., Witkowski A. Analiza krajowych możliwości stosowania urządzeń do aeracji ścieków przy użyciu sprężonego powietrza. Praca dyplomowa. Inst.Zaop. w Wodę i Bud. Wodnego Pol.Warsz. /maszynopis niepubl./ Warszawa 1975

27. Tabernacki J., Wenda R., Witkowski A. Możliwości stosowania w kraju komór osadu czynnego z głębokim wprowadzeniem sprężonego powietrza. Mat.XIX Konf. n.t. „Postęp techniczny w dziedzinie oczyszczania ścieków" Katowice 1976

28. Prospekty firmy Ferro Corporation 1974

29. Polcon Corporation, Environmental Control Systems. - materiały firmowe 1975

30. Kenics Aerator, Kenics Corporation Biulletin AE-1

31. Bennet C., Shell G. Submerged static aerator development program for the Ralph B.Carter Company. Final Report, June, 1975

32. Ralph B.Carter Company Catalog D-751

33. Bennet C., Shell G. Submerged Static Aerators: What are they all abaut. Water a.Wastes Eng. Nr 5, 1976, s.37

34. Kiliszek R., Królikowski W. Problem zastosowania w kraju systemu głębokiego napowietrzania w komorach osadu czynnego Biuletyn Techniczny Centrum Techniki Komunalnej Nr 1, 1977

35. Kiliszek R., Królikowski W. i inni, Założenia generalne systemu unifikacyjnego małych, średnich i dużych oczyszczalni ścieków. Centrum Techniki Komunalnej /maszynopis niepublikow./ Warszawa 1975

36. Stewart M.J., Lidkea T.R. Vertical Static Tube Aerators: Evaluating Their Performance. Water a.Sew.Works Ref.Num., 1976, R-80

37. Hsu H.H., Wang K.B., Fan L.T. Oxygen Transfer and Absorption Efficiencies in Bubble Columns.Water a.Sew.Works, Nr 2, 1975, s.34

38. Gańczarczyk J.; Suschka J.: Wstępne badania nad kinetyką napowietrzania sprężonym powietrzem o niskim ciśnieniu. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej "Postęp techniczny w oczyszczaniu ścieków", Katowice 1960, s.143

39. Depczyński W., Roman M., Tabernacki J. Dyfuzor do gazowania cieczy, zwłaszcza do napowietrzania ścieków. P 175873 Urząd Patentowy PRL.

40. Roman M., Tabernacki J., Wenda R., Witkowski A. Urządzenie do gazowania cieczy. Zgłoszenie patentowe P-200673 Dział Wynalazczości i Ochrony Patentowej Politechniki Warszawskiej

41. Królikowski W., Suchecka T. Oznaczanie zdolności do napowietrzania /OC/ urządzeń napowietrzających. Przegląd Informacyjny IGK Wodociągi i Kanalizacja Nr 2 IGK. Warszawa 1962

42. Hermanowicz W., Dożańska W., Dojlido J., Koziorowski B. Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. Arkady, Warszawa 1976.

43. Archiwum pracy doktorskiej J.Tabernackiego. Plik materiałów, notatniki, wyniki obliczeń. Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej.

44. Błaszczyk W. Roman M., Stamatello H. Kanalizacja t.2 Arkady, Warszawa 1974

45. Królikowski W. Podstawy i zasady projektowania komór osadu czynnego z punktu widzenia ekonomicznej efektywności operacji napowietrzania. Dysertacja. Politechnika Warszawska, 1971

46. Kołodziejczyk L., Malicki M., Wasilewski W., Zajączkowski J. Ogrzewanie i wentylacja - Poradnik, Arkady, Warszawa 1966

47. Zarządzenie Przewodniczącego Komisji Planowania przy Radzie Ministrów z dn. 26.07.1974 w sprawie zasad oceny ekonomicznej efektywności inwestycji nieprodukcyjnych. Mon.Pol. Nr 28 poz.168

48. Zarządzenie Nr 16 M.A.G.T.O.Ś. z dn. 20.06.1977 w sprawie zasad oceny ekonomicznej efektywności inwestycji gospodarki komunalnej, Warszawa 1977 M.A.G.T.O.Ś.

49. Uchwała Nr 95 R.M. z dn. 27.04.1973 w sprawie amortyzacji środków trwałych M.P. 6.06.1973, Nr 25, poz.151

T A B L I C E

Spis tablic

Tabl.2-1 Wyniki badań Hörlera [13] zależności prędkości wnoszenia pęcherzyków sprężonego powietrza od wielkości pęcherzyka

Tabl.3-1 Charakterystyka dyfuzorów porowatych oferowanych przez firmy europejskie [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

Tabl.3-2 Parametry pracy i efekty działania mieszalników Helixor firmy Polcon [29]

Tabl.3-3 Parametry pracy i efekty działania mieszalników Kenics firmy Kenics [30]

Tabl.3-4 Parametry pracy i efekty działania mieszalników Static Mixaerator firmy Ralph B.Carter Company [31], [32], [33]

Tabl.7-1 Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzora HKL 210 firmy Nokia przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}

Tabl.7-2 Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzorów tkaninowych z tkaniną PT-48 przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}.

Tabl.7-3 Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzorów tkaninowych z tkaniną PT-79 przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}.

Tabl.7-4 Przykład wydruku danych do obliczeń i wyników wstępnej interpretacji pomiarów kinetyki natleniania OC

Tabl.7-5 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.

Tabl.7-6 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.

Tabl.7-7 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

Tabl.7-8 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

Tabl.7-9 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy stałym napełnieniu zbiornika H_{ZB} i zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

Tabl.7-10 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy stałym napełnieniu zbiornika H_{ZB} i zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

Tabl.7-11 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych: napełnieniu zbiornika H_{ZB}, wysokości mieszalnika H_M, i rozstawie siatek m

Tabl.7-12 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych: napełnieniu zbiornika H_{ZB}, wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

Tabl.7-13 Zależność efektywności natleniania mierzonego wartością OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

Tabl.7-14 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M.

Tabl.7-15 Zależność wzrostu szybkości wymiany tlenu R od intensywności napowietrzania I i rozstawu siatek m w mieszalniku siatkowym

Tabl.7-16 Moc netto dla dyfuzorów obliczona wzorem /7-7/ dla ustalenia wskaźnika E wzorem /7-4/ /tablica pomocnicza/

Tabl.7-17 Moc netto dla układów z mieszalnikami siatkowymi obliczona wzorem /7-7/ dla ustalenia wskaźnika E wzorem /7-4/ /tablica pomocnicza/

Tabl.7-18 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.

Tabl.7-19 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

Tabl.7-20 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Tabl.7-21 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}, wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

Tabl.7-22 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

Tabl.8-1 Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m

Tabl.8-2 Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m

Tabl.8-3 Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1,5 m

Tabl.8-4 Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1,5 m

Tabl.8-5 Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1 m

Tabl.8-6 Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1 m

Tablica 2-1

Wyniki badań Hörlera [13] zależności prędkości wznoszenia pęcherzyków sprężonego powietrza od wielkości pęcherzyka

Obszar	Wielkość pęcherzyków d_p mm	Zakres liczby Reynoldsa R_e	Orientacyjny zakres prędkości V_p m/s	Warunek kryterialny [x]	Wartości stałych do wzoru 2-13	
					B	n
1	do 0,15	pon. 2	0,013	Re/Fr = 18	$0{,}420 \cdot 10^{6}$	2
2	0,15 do 2,1	2 do 774	0,013 do 0,32	$Re = 47 \cdot Fr^{3}/2$	$0{,}707 \cdot 10^{3}$	1,25
3	2,1 do 7,2	774 do 1380	0,32 do 0,19	We = 3,64	$0{,}164 \cdot 10^{-1}$	-0,5
4	pow. 7.2	pow. 1380	pow. 0,19	Fr = 0,51	$0{,}224 \cdot 10^{1}$	0,5

[x] Re - liczba Reynoldsa wg wzoru 2-12

Fr - liczba Froude'a $Fr = \frac{v_p^2}{d_p \cdot g}$

We - liczba Webera $We = \frac{\varrho \cdot v_p^2 \cdot d_p}{\sigma}$

gdzie:

σ - wsp.napięcia powierzchniowego, $kg \cdot s^{-2}$

pozostałe oznaczenia w tekście

Tablica 3-1

Charakterystyka dyfuzorów porowatych oferowanych przez firmy europejskie

[17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

Firma /kraj/	Nazwa dyfuzora	Kształt dyfuzora	Materiał filtrosowy	Wymiary [mm]	Przepływ powietrza [m^3/h]	Opory przy przepływie powietrza [m H_2O]	OC [gO_2/m^3h]	E [kgO_2/kWh]	Sposób regeneracji
Nokia A.B. /Finlandia/	HKP 600 MKP 600 HKL 210 MKL 210	rury dyski	polietylen o różnej porowatości	śred.67 dł. 600 śred.210	5 do 28 2 do 7	0,1 do 0,4 0,2 do 0,7	90 do 150	teoret. 4 do 8	1.Woda o wysokim ciśnieniu 2.Kąpiel w roztworze detergentu 3.Kąpiel w roztworze kwasu
Flygt /Szwecja/	4701	prosto-padł.	porowate tw.sztuczne	120x120x 950	8 do 25	do 0,5	10 do 300	-	-
Degremont /Francja/	DP-230	dyski	granulowane tlenki glinu /Corindon/	śred.230	1,5 do 4	0,15 do 0,6	30 do 250	-	-
Schumacher /RFN/	Brandol	płyty kołpaki rury	ziarna tlenku glinu sklejone żywicą /Brandol/	480x185x 20 śred.100 wys. 100 śred.100 70 dł. 1000	10 do 40 5 do 20 10 do 45	0,05 do 0,4	- - 20 do 120	- - 0,1 do 0,35	Woda o wysokim ciśnieniu
Activated Sludge Ltd /W.Bryt./ Norton /USA/	Dome	kołpaki	ziarna tlenku glinu sklejone szkłem silikonowym /Alundum/	śred.180 wys. 38	0,9 do 3	0,5 do 0,35	50 do 100	teoret. 4	-
Kucsinskij Zawod Ceram Izd. /ZSRR/	-	płyty rury	szamot sklejony ciekłym szkłem lub piasek kwarcowy i koks sklejony żywicą	300x300x 40 śred.50-350 dł.500 do 760	3,6 do 14,4 1,35 do 15,4	0,1 do 0,4 -	10 do 120 10 do 180	ok. 3,2 ok. 3,2	-

Tablica 3-2

Parametry pracy i efekty działania mieszalników Helixor firmy Polcon [29]

Napełnienie zbiornika H_{ZB} [m]	Długość mieszalnika H_M [m]	Przepływ powietrza /na 1 miesz./ Q_p [m^3/h]	Wydajność tlenowa z badań /dla wody/ O [kg O_2/h]	Obliczeniowa wydajność tlenowa /dla ścieków/ O_s [kg O_2/h]	OC /obliczone na podstawie podanych war. badań/ [g O_2/m^3 h]
3	1,8	41	1,3	0,7	7,5
4,5	2,7	44	1,6	0,9	6,2
6	3,65	48	1,8	1	5

Parametry pracy i efekty działania mieszalników Kenics firmy Kenics [30]

Napełnienie zbiornika H_{ZB} [m]	Przepływ powietrza Q_p [m^3/h]	Wydajność tlenowa x O [kg O_2/h]	Efektywność energetyczna E [kg O_2/kWh]	Współczynnik pompowania xx [m^3/h]
3	34 ÷ 64	0,8 ÷ 1,4	1,8 ÷ 1,4	90 ÷ 150
4,5	34 ÷ 64	1,2 ÷ 2	2 ÷ 1,6	107 ÷ 164
6	34 ÷ 64	1,7 ÷ 2,7	2,1 ÷ 1,7	114 ÷ 168

Uwagi:

x w odniesieniu do wody

xx org. Circulation ratio of liquid /brak danych o sposobie pomiaru/

Tablica 3-4

Parametry pracy i efekty działania mieszalników Static Mixaerator firmy Ralph B.Carter Company [31], [32], [33].

Napełnienie zbiornika H_{ZB} [m]	Przepływ powietrza Q_p [m^3/h]	Wydajność tlenowa O [kgO_2/h]	Efektywność energetyczna[x] E [kgO_2/kWh]	OC[xx] [gO_2/m^3h]
3	17 ÷ 100	0,27 ÷ 1,6	0,9 ÷ 0,8	5,3 ÷ 31
4,5	17 ÷ 100	0,36 ÷ 2,1	1 ÷ 0,9	4,7 ÷ 27
6	17 ÷ 100	0,45 ÷ 2,9	1,2 ÷ 1,1	4,4 ÷ 28

Uwagi:

x maleje ze wzrostem przepływu powietrza

xx wyliczone na podstawie podanych warunków badań

Tablica 7-1

Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzora HKL 210 firmy Nokia przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}

Lp.	I $[m^3/hm^2]$	Wysokość oporów Δh $[cm\ H_2O]$ przy różnych napełnieniach zbiornika H_{ZB} [m]				
		0,12	0,8	1,5	2	2,35
1	1,05	28,9	92,8	162,4	211,7	246,6
2	1,5	30	94,8	164,3	214,1	249,7
3	1,95	31	96,8	166,2	216,2	252,2
4	2,4	31,6	98,4	167,4	218,2	253,4
5	2,85	32	99,5	168,4	218,6	254,9
6	3,4	32,4	100,1	169,3	219,2	255,8
7	3,9	33,6	100,5	169,9	219,6	256,4
8	4,4	34,4	101,1	170,2	220,1	256,8
9	5,2	36,8	102,8	172,9	221,7	260,2
10	8	38,8	105,6	175,1	225,3	262
11	10,2	41,3	108,2	176,8	227,3	265,4
12	12,6	43,3	109,6	177,9	228,5	266,8
13	15	43,9	112	179,4	230	268,5
14	17,6	46,4	113,4	181,7	231,7	269,4
15	20	49,4	115,7	183,9	233,9	270,3

Tablica 7-2

Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzorów tkaninowych z tkaniną PT-48 przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}

Lp.	I $[m^3/h\ m^2]$.	Wysokość oporów Δh [cm H_2O] przy różnych napełnieniach zbiornika H_{ZB} [m]				
		0,12	0,8	1,5	2	2,35
1	1,05	22,3	87,5	159,5	210,7	244
2	1,5	23,9	92,2	160,6	210,8	245
3	1,95	24,5	93	161,2	211,2	245,8
4	24	25,4	94,1	162	211,8	246,9
5	2,85	26,2	94,3	162,7	212,6	247,4
6	3,4	27	94,9	163	212,9	247,9
7	3,9	27	95,4	163	213,5	248,8
8	4,4	29,3	96,2	163,8	213,7	249,2
9	5,2	29,4	97	164,4	213,9	250,4
10	8	29,4	97,4	165,4	214	251
11	10,2	29,4	97,5	166	214,7	251,2
12	12,6	31	98,6	167	216,4	252
13	15	31,8	98,6	168,2	217	253,6
14	17,6	32,6	100,2	168,5	218,6	255,2
15	20	-	101,8	170,1	220	256,8

Tablica 7-3

Zależność wysokości oporów Δh od intensywności napowietrzania I dla dyfuzorów tkaninowych z tkaniną PT-79 przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}

Lp.	I	Wysokość oporów Δh [cm H_2O] przy różnych napełnieniach zbiornika H_{ZB} [m]				
	[$m^3/h\ m^2$]	0,12	0,8	1,5	2	2,35
1	1,05	34,7	104,5	173,5	224,9	258,8
2	1,5	35,9	105,2	174,7	226,2	260
3	1,95	36,8	106,1	175,4	226,7	261,1
4	2,4	37,8	106,7	176,2	227,5	261,8
5	2,85	38,5	107,3	176,8	228	262,6
6	3,4	39,6	107,9	177,4	228,4	262,9
7	3,9	40	108,3	177,7	228,9	263,5
8	4,4	40,5	108,7	178,3	229,1	263,9
9	5,2	41,8	110	179	230,1	264,8
10	8	43,6	111	180,6	232,1	266,6
11	10,2	45,1	112,5	181,9	233,6	268,2
12	12,6	46,9	114	183,4	234,7	270
13	15	48,2	115,7	185,2	235,6	271,6
14	17,6	50,4	117,4	187,1	236,9	273,2
15	20	52,4	119,1	189	238,7	274,8

KINETYKA NATLENIANIA - WYNIKI POMIAROW I OBLICZEN T A B L I C A Z-2.198

TYP DYFUZOROW = OTW+MS
LICZBA DYFUZOROW = 2 SZT.
WYS.MIESZALNIKA = 0.50 M
ROZSTAW SIATEK = 4.5 CM

NAPELNIENIE ZBIORNIKA = 2.00 M
TEMPERATURA WODY = 18.5 DEG C
POCZ.ZUZYCIE TIOSIARCZ.SODU = 0.3 ML (*)
INTENSYWNOSC NAPOWIETRZANIA = 4.0 M3/H

PKT POB. NR	ZUZYCIE TIOSIARCZANU SODU, ML (*) PRZY ROZNYCH CZASACH NAPOWIETRZANIA							OBL. IL. POM.	POZIOM ODCHYL. SYSTEM.		WSP. KO- REL.	SR. BL. KW.	ZDOLN. NATLE- NIANIA	WSP. WYKORZ. TLENU
	1.0 MIN	3.0 MIN	5.0 MIN	7.0 MIN	10.0 MIN	15.0 MIN	20.0 MIN		P1	P2	R %	S %	OC G/M3/H	K G/M3/M
3	0.8	1.7	2.6	3.3	4.4	5.4	6.7	6-0	+1	+2	99	2	24.0	6.01
								6-1	+1	+1	99	3	24.0	6.01
4	0.9	1.8	2.7	3.3	4.4	5.7	6.5	6-0	+2	+2	99	3	24.0	6.02
								6-1	+2	+1	98	3	24.0	6.01
5	0.8	1.5	2.4	3.2	4.1	5.7	6.5	6-0	+0	-2	99	2	23.5	5.89
								6-1	+1	-1	99	2	23.5	5.89
6	0.7	1.7	2.4	3.2	4.2	5.5	6.7	6-0	+1	-2	99	1	23.9	5.97
								6-1	+1	-1	99	1	23.8	5.97

(*) - TIOSIARCZAN SODU 0,01-NORMALNY, ZUZYCIE NA 100 ML WODY

Tablica 7-4

Przykład wydruku danych do obliczeń i wyników wstępnej interpretacji pomiarów kinetyki natleniania OC

Tablica 7-5

Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

I	OC $[g\ O_2/m^3\ h]$											
	H_{ZB} = 0,8 m			H_{ZB} = 1,5 m			H_{ZB} = 2 m			H_{ZB} = 2,35 m		
$[m^3/h\ m^2]$	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79
2	19	11	11	18	12	13	17	13	12	13	20	16
4	19	16	15	21	22	16	20	21	17	22	20	20
8	24	20	18	33	25	27	33	37	34	40	29	30
12	37	25	20	22	26	35	29	30	35	43	37	25

Tablica 7-6

Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

I	K [g O_2/m^3 m]											
	H_{ZB} = 0,8 m			H_{ZB} = 1,5 m			H_{ZB} = 2 m			H_{ZB} = 2,35 m		
[$m^3/h\ m^2$]	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79
2	9,5	5,5	5,5	9	6	6,5	8,5	6,5	6	6,5	10	8
4	4,8	4	3,8	5,3	5,5	4	5	5,3	4,3	5,5	5	5
8	3	2,5	2,3	4,1	3,1	3,4	4,1	4,6	4,3	5	3,6	3,8
12	3,1	2,1	1,7	1,8	2,2	2,9	2,4	2,5	2,9	3,6	3,1	2,1

Tablica 7-7

Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

I	OC $[g\ O_2/m^3\ h]$									
	H_{ZB}=1 m, H_M= 0,5 m		H_{ZB}=1,5m, H_M=1 m		H_{ZB}=2m, H_M=1,5 m		H_{ZB}=2m, H_M=1 m		H_{ZB}=2m, H_M=0,5 m	
$[m^3/hm^2]$	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48
2	40	31	39	15	33	21	35	20	33	26
4	19	22	44	19	48	32	42	42	18	46
8	94	80	95	77	87	38	92	53	104	82
12	37	33	27	40	38	36	35	30	90	34

Tablica 7-8

Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi, we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

I	K $[g\ O_2/m^3\ m]$									
	H_{ZB}=1m, H_M= 0,5 m		H_{ZB}=1,5m, H_M= 1 m		H_{ZB}=2m, H_M=1,5m		H_{ZB}=2m, H_M= 1 m		H_{ZB}=2m, H_M=0,5m	
$[m^3/hm^2]$	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48
2	20	15,5	19,5	7,5	16,5	10,5	17,5	10	16,5	13
4	4,8	5,5	11	4,8	12	8	10,5	10,5	4,5	11,5
8	11,8	10	11,9	9,6	11	4,8	11,5	6,6	13	10,3
12	3,1	2,8	2,2	3,3	3,2	3	2,9	2,5	7,5	2,8

Tablica 7-9

Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy stałym napełnieniu zbiornika H_{ZB} i zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	OC $[gO_2/m^3h]$ dla rozstawu siatek m [cm]				
			0[x]	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	6	31	29	19	17
4	2	1,5	7	20	36	31	28
8	2	1,5	39	100	91	70	61
12	2	1,5	64	38	27	21	93
2	2	1	8	35	25	13	
4	2	1	10	42	21	38	
8	2	1	42	112	81	70	nie badano
12	2	1	36	26	102	102	
2	2	0,5	9	9	18	16	
4	2	0,5	21	48	24	24	
8	2	0,5	46	85	70	64	nie badano
12	2	0,5	25	35	69	48	

[x] oznacza brak siatek tj. badanie układu z pustą obudową mieszalnika

Tablica 7-10

Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy stałym napełnieniu zbiornika H_{ZB} i zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	K $[gO_2/m^3m]$ dla rozstawu siatek m [cm]				
			0[x]	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	3	15,5	14,5	9,5	8,5
4	2	1,5	1,8	5	9	7,8	7
8	2	1,5	4,9	12,5	11,4	8,75	7,6
12	2	1,5	5,3	3,2	2,2	1,7	7,7
2	2	1	4	17,5	12,5	6,5	nie badano
4	2	1	2,5	10,5	5,3	9,5	
8	2	1	5,3	14	10,1	8,8	
12	2	1	3	2,2	8,5	8,5	
2	2	0,5	4,5	4,5	9	8	nie badano
4	2	0,5	5,3	12	6	6	
8	2	0,5	5,8	10,6	8,8	8	
12	2	0,5	2,1	2,9	5,7	4	

[x] oznacza brak siatek tj. badanie układu z pustą obudową mieszalnika

Tablica 7-11

Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych: napełnieniu zbiornika H_{ZB}, wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	OC $[gO_2/m^3h]$ dla rozstawu siatek m [cm]				
			0[x]	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	6	31	29	19	17
4	2	1,5	7	20	36	31	28
8	2	1,5	39	100	91	70	61
12	2	1,5	64	38	27	21	93
2	1,5	1	12	34	25	20	15
4	1,5	1	22	14	46	33	24
8	1,5	1	39	42	83	66	51
12	1,5	1	43	141	41	28	26
2	1	0,5	11	27	20	15	
4	1	0,5	12	44	12	11	
8	1	0,5	39	87	61	58	nie badano
12	1	0,5	25	22	30	20	

[x] oznacza brak siatek

Tablica 7-12

Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania przy zmiennych: napełnieniu zbiornika H_{ZB} wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	K $[gO_2/m^3m]$ dla rozstawu siatek m [cm]				
			0[x]	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	3	15,5	14,5	9,5	8,5
4	2	1,5	1,8	5	9	7,8	7
8	2	1,5	4,9	12,5	11,4	8,8	7,6
12	2	1,5	5,3	3,2	2,2	1,7	7,7
2	1,5	1	6	17	12,5	10	7,5
4	1,5	1	5,5	3,5	11,5	8,3	6
8	1,5	1	4,9	5,3	10,4	8,3	6,4
12	1,5	1	3,6	11,7	3,4	2,3	2,2
2	1	0,5	5,5	13,5	10	7,5	
4	1	0,5	3	11	3	2,8	
8	1	0,5	4,9	10,9	7,6	7,3	nie badano
12	1	0,5	2,1	1,8	2,5	1,7	

x oznacza brak siatek tj. badanie układu z pustą obudową mieszalnika

Tablica 7-13

Zależność efektywności natleniania mierzonej wartością OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzania sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

I	OC [g O_2/m^3 h]														
	H_{ZB}=2m, H_M=1,5 m			H_{ZB}=2m, H_M= 1 m			H_{ZB}=2m, H_M=0,5m			H_{ZB}=1,5m, H_M= 1m			H_{ZB}=1m, H_M=0,5 m		
[m^3/hm^2]	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA
2	31	16	23	35	15	39	9	19	41	34	14	16	27	22	48
4	20	22	72	42	25	63	48	20	55	14	14	72	44	33	75
8	100	24	142	112	41	116	85	47	108	42	22	110	87	42	106
12	38	40	33	26	26	147	35	-	121	141	35	43	22	34	38

Tablica 7-14

Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

I	K $[g\ O_2/m^3\ m]$														
	H_{ZB}=2m, H_M=1,5 m			H_{ZB}=2m, H_M= 1 m			H_{ZB}=2m, H_M=0,5m			H_{ZB}=1,5m, H_M=1 m			H_{ZB}= 1 m, H_M= 0,5 m		
$[m^3/hm^2]$	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA
2	15,5	8	11,5	17,5	7,5	19,5	4,5	9,5	20,5	17	7	8	13,5	11	24
4	5	3,5	18	10,5	6,3	15,8	12	5	13,8	3,5	3,5	18	11	8,3	18,8
8	12,5	3	17,8	14	5,1	14,5	10,6	5,9	13,5	5,3	2,8	13,8	10,9	5,3	13,3
12	3,2	3,3	2,7	2,2	2,2	12,2	2,9	-	10,1	11,7	2,9	3,6	1,8	2,8	3,2

Tablica 7-15

Zależność wzrostu szybkości wymiany tlenu ΔR od intensywności napowietrzania I i rozstawu siatek m w mieszalniku siatkowym

I	ΔR $[g\ O_2/h]$			
$[m^3/hm^2]$	m = 1,5 cm	m = 4,5 cm	m = 9 cm	m = 18 cm
2	50	46	26	22
4	28	58	48	42
8	122	104	62	44
12	-52	-74	-86	58

Tablica 7-16

Moc netto dla dyfuzorów obliczona wzorem /7-7/ dla ustalenia wskaźnika E wzorem /7-4/ /tablica pomocnicza/

Q_p	$N \cdot 10^3$ [kW]											
	H_{ZB} = 0,8 m			H_{ZB} = 1,5 m			H_{ZB} = 2 m			H_{ZB} = 2,35 m		
[m^3/h]	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79
2	5,23	5,07	5,78	9,05	8,83	9,54	11,8	11,6	12,4	13,7	13,4	14,9
4	10,9	10,4	11,8	18,5	17,8	19,4	24	23,2	25	28	27	30
8	23,1	21,1	24,2	37,7	36	39,5	49,1	46,7	50,6	57,3	54,7	60,8
12	36	32,7	37,3	58,2	54,6	59,8	74,6	70,6	76,5	87	82,7	92,5

Tablica 7-17

Moc netto dla układów z mieszalnikami siatkowymi obliczona wzorem /7-7/ dla ustalenia wskaźnika E wzorem /7-4/

/tablica pomocnicza/

Q_p $[m^3/h]$	$N \cdot 10^3$ [kW]		
	H_{ZB} = 1 m	H_{ZB} = 1,5 m	H_{ZB} = 2 m
2	5,45	8,2	10,9
4	10,9	16,4	21,8
8	21,8	32,7	43,6
12	32,7	49,1	64,4

Tablica 7-18

Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

I	E kg $[O_2/kWh]$											
	H_{ZB} = 0,8 m			H_{ZB} = 1,5 m			H_{ZB} = 2 m			H_{ZB} = 2,35 m		
$[m^3/hm^2]$	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79	NOKIA	PT-48	PT-79
2	2,9	1,74	1,52	3	2,04	2,04	2,88	2,24	1,94	2,23	3,51	2,52
4	1,4	1,23	1,02	1,7	1,85	1,24	1,67	1,81	1,36	1,85	1,74	1,57
8	0,83	0,76	0,6	1,31	1,04	1,03	1,34	1,58	1,34	1,64	1,25	1,16
12	0,82	0,61	0,43	0,57	0,71	0,88	0,78	0,85	0,92	1,16	1,05	0,64

Tablica 7-19

Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika wodą H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi materiałami porowatymi we współpracy z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości H_M

I	E [kg O_2/kWh]							
	H_{ZB}= 1,5m, H_M= 1 m		H_{ZB}= 2 m, H_M= 1,5 m		H_{ZB}= 2 m, H_M= 1 m		H_{ZB}= 2 m, H_M= 0,5 m	
[m^3/h m^2]	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48	NOKIA	PT-48
2	6,46	2,55	5,59	3,62	5,9	3,45	5,59	4,48
4	3,57	1,6	4	2,76	3,5	3,62	1,5	4
8	3,78	3,2	3,54	1,63	3,75	2,27	4,24	3,5
12	0,7	1,1	1,02	1,02	0,94	0,85	2,41	0,96

Tablica 7-20

Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla zmiennych: wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	E $[kgO_2/kWh]$ dla różnych m [cm]				
			0^x	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	1,1	5,7	5,3	3,5	3,1
4	2	1,5	0,64	1,8	3,3	2,8	2,6
8	2	1,5	1,8	4,6	4,2	3,2	2,8
12	2	1,5	2	1,2	0,84	0,65	2,9
2	2	1	1,5	6,4	4,6	2,4	nie badano
4	2	1	0,92	3,9	1,9	3,5	
8	2	1	1,9	5,1	3,7	3,2	
12	2	1	1,1	0,81	3,2	3,2	
2	2	0,5	1,7	1,7	3,3	2,9	nie badano
4	2	0,5	1,9	4,4	2,2	2,2	
8	2	0,5	2,1	3,9	3,2	2,9	
12	2	0,5	0,78	1,1	2,1	1,5	

0^x pusta obudowa mieszalnika

Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB}, wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m

I $[m^3/h\ m^2]$	H_{ZB} [m]	H_M [m]	E $[kgO_2/kWh]$ dla różnych m [cm]				
			0^x	1,5	4,5	9	18
2	2	1,5	1,1	5,7	5,3	3,5	3,1
4	2	1,5	0,64	1,8	3,3	2,8	2,6
8	2	1,5	1,8	4,6	4,2	3,2	2,8
12	2	1,5	2	1,2	0,84	0,65	2,9
2	1,5	1	2,2	6,2	4,6	3,7	2,7
4	1,5	1	2	1,3	4,2	3	2,2
8	1,5	1	1,8	1,9	3,8	3	2,3
12	1,5	1	1,3	4,3	1,3	0,86	0,8
2	1	0,5	2	5	3,7	2,8	nie badano
4	1	0,5	1,1	4	1,1	1	
8	1	0,5	1,8	4	2,8	2,7	
12	1	0,5	0,76	0,67	0,9	0,61	

0^x pusta obudowa mieszalnika

Tablica 7-22

Zależność wskaźnika efektywności natleniania E od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzania sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych napełnień zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

I	E [kg O_2/kWh]											
	H_{ZB}= 2 m, H_M= 1,5 m			H_{ZB}= 2 m, H_M= 1 m			H_{ZB}= 2 m, H_M= 0,5 m			H_{ZB}= 1,5 m, H_M = 1 m		
[m^3/h m^2]	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA	OTWÓR	PT-48	NOKIA
2	5,7	2,8	3,9	6,4	2,6	6,6	1,7	3,2	6,9	6,2	2,4	2,7
4	1,8	1,9	6	3,9	2,2	5,3	4,4	1,7	4,6	1,3	1,2	5,8
8	4,6	1	5,8	5,1	1,8	4,7	3,9	2	4,4	1,9	0,92	4,4
12	1,2	1,1	0,9	0,81	0,74	3,9	1,1	-	3,2	4,3	0,96	1,1

Tablica 8-1

Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m

WSKAŹNIKI	I $[m^3/hm^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M=1	MS 1,5; H_M= 1	MS 4,5; H_M= 1,5	PT-48 + MSO; H_M = 0,5
Efektywność natleniania OC $[gO_2/m^3h]$	2	17	39	35	29	26
	4	20	63	42	36	46
	8	33	116	112	91	82
	12	29	147	26	27	34
Efektywność energetyczna E $[kgO_2/kWh]$	2	2,9	6,6	6,4	5,3	4,5
	4	1,7	5,3	3,9	3,3	4
	8	1,3	4,7	5,1	4,2	3,5
	12	0,8	3,9	0,8	0,8	1
Roczny efekt użytkowy W $[kg\ O_2/a]$	2	298	683	613	508	456
	4	350	1104	736	631	806
	8	578	2032	1962	1594	1437
	12	508	2575	456	473	596
Roczne zużycie energii Z_E [kWh/a]	2	103	103	96	96	101
	4	210	208	189	191	202
	8	431	432	385	380	411
	12	651	660	570	591	596

Tablica 8-2

Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m

WSKAŹNIKI		I $[m^3/hm^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M= 1,5	MS 1,5; H_M= 1	MS 4,5; H_M= 1	PT 48 + MSO; H_M = 0,5
Materiałochłonność [kg/sztukę]	St.alumin.		-	4,1	4,1	6	2,2
	Tw.sztuczne		0,6	2,2	1,6	0,8	0,4
	Razem		0,6	6,3	5,7	6,8	2,6
Koszty materiałów I_M; [zł]			1200	1635	435	510	200
Koszty energii K_E [zł/a]		2	103	103	96	96	101
		4	210	208	189	191	202
		8	431	432	385	380	411
		12	651	660	570	591	596
Wskaźnik efektywności ekonomicznej E_1 [zł/kg O_2]		2	1	0,55	0,27	0,35	0,29
		4	1,17	0,43	0,35	0,44	0,29
		8	1,09	0,35	0,23	0,29	0,31
		12	1,7	0,36	1,4	1,43	1,06

Tablica 8-3

Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m

WSKAŹNIKI	I $[m^3/hm^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M= 1	MS 4,5; H_M= 1	PT 48 + MSO; H_M = 1
Efektywność natleniania OC $[gO_2/m^3h]$	2	18	16	25	15
	4	21	72	46	19
	8	33	110	83	77
	12	22	43	41	40
Efektywność energetyczna E $[kg\ O_2/kWh]$	2	3	2,7	4,6	2,6
	4	1,7	5,8	4,2	1,6
	8	1,31	4,4	3,8	3,2
	12	0,57	1,1	1,3	1,1
Roczny efekt użytkowy W $[kg\ O_2/a]$	2	237	210	329	197
	4	276	946	604	250
	8	434	1445	1091	1012
	12	289	565	539	526
Roczne zużycie energii Z_E $[kWh/a]$	2	79	78	73	76
	4	162	163	144	156
	8	331	328	287	316
	12	507	514	415	478

Tablica 8-4

Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1, 5 m

WSKAŹNIKI		I $[m^3/h\ m^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M= 1	MS 4,5; H_M= 1	PT 48 + MSO; H_M = 1
Materiałochłonność [kg/sztukę]	St.aluminiowy		-	4,1	4,1	4,1
	Tw.sztuczne		0,6	2,2	0,53	0,4
	Razem		0,6	6,3	4,63	4,5
Koszty materiałów I_M [zł]			1200	1635	340	325
Koszty energii K_E [zł/a]		2	79	78	73	76
		4	162	163	144	156
		8	331	328	287	316
		12	507	514	415	478
Wskaźnik efektywności ekonomicznej E_1 [zł/kgO_2]		2	1,17	1,44	0,39	0,66
		4	1,3	0,41	0,33	0,84
		8	1,22	0,38	0,31	0,37
		12	2,44	1,31	0,81	1,01

Tablica 8-5

Zestawienie rocznych efektów użytkowych i zużycia energii dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1 m

WSKAŹNIKI	I $[m^3/h\,m^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M= 0,5	MS 4,5; H_M= 0,5	PT 48 + MSO; H_M = 0,5
Efektywność natleniania OC $[gO_2/m^3\,h]$	2	19	48	27	31
	4	19	75	44	22
	8	24	106	87	80
	12	37	38	22	33
Efektywność energetyczna E $[kg\ O_2/kWh]$	2	2,9	8,7	5	4,1
	4	1,4	6,3	4	1,9
	8	0,83	4,3	4	3,3
	12	0,82	0,95	0,9	0,9
Roczny efekt użytkowy W $[kg\ O_2/a]$	2	166	420	237	272
	4	166	657	385	193
	8	210	929	762	701
	12	324	333	193	289
Roczne zużycie energii Z_E [kWh/a]	2	57	48	47	66
	4	119	104	96	102
	8	253	216	191	212
	12	395	350	214	321

Tablica 8-6

Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej E_1 i ich elementów składowych dla wybranych układów przy napełnianiu zbiornika H_{ZB} = 1 m

WSKAŹNIKI		I $[m^3/hm^2]$	NOKIA	NOKIA + MS 1,5; H_M= 0,5	MS 4,5; H_M= 0,5	PT 48 + MSO; H_M = 0,5
Materiałochłonność [kg/sztukę]	St.alumin.		-	2,2	2,2	2,2
	Tw.sztuczne		0,6	1,4	0,3	0,4
	Razem		0,6	3,6	2,5	2,6
Koszty materiałów	I_M [zł]		1200	1445	160	195
Koszty energii K_E [zł/a]		2	57	48	47	66
		4	119	104	96	102
		8	253	216	191	212
		12	395	350	214	321
Wskaźnik efektywności ekonomicznej E_1 [zł/kg O_2]		2	1,54	0,68	0,31	0,36
		4	1,91	0,52	0,32	0,7
		8	2,15	0,49	0,29	0,35
		12	1,83	1,77	1,25	1,22

R Y S U N K I

Spis rysunków

Rys.3-1 Schemat mieszalnika ślimakowego firmy Polcon: 1-obudowa, 2-ślimacznica, 3-mocowanie, 4-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 5-podstawa /bloczek betonowy/

Rys.3-2 Charakterystyka wydajności tlenowej mieszalnika Helixor firmy Polcon

Rys.3-3 Mieszalnik firmy Kenics: 1-elementy obudowy, 2-przegrody, 3-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 4-podstawa /bloczek betonowy/

Rys.3-4 Mieszalnik Static Mixaerator firmy Ralph B. Carter Comp.: 1-obudowa, 2-otwory w obudowie, 3-przegrody, 4-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 5-podstawa

Rys.4-1 Porównanie oporów tkanin z innymi materiałami filtrosowymi według badań radzieckich [24]: 1-tkanina Nr 56007, 2-tkanina Nr 1520, 3-tkanina Nr 56026, 4-płytka filtrosowa, 5-rura ceramiczna 500 mm

Rys.4-2 Dyfuzor tkaninowy dyskowy wg P-175873: 1-króciec z gwintem, 2-obudowa, 3-opaska z zawleczką, 4-tkanina.

Rys.4-3 Dyfuzor tkaninowy rurowy wg P-175873: 1-trójnik, 2-opaska z zawleczką, 3-rura perforowana, 4-tkanina.

Rys.4-4 Mieszalnik siatkowy wg P-200673: 1-płytka betonowa, 2-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 3-nogi, 4-siatki, 5-obudowa

Rys.6-1 Schemat stanowiska badawczego: 1-zbiornik, 2-okna ze szkła organicznego, 3-króćce do poboru prób wody, 4-spust, 5-wodowskaz, 6-sprężarka, 7-zawór redukcyjny, 8-manometr mechaniczny, 9-rotametry, 10-zawory, 11-manometr różnicowy

Rys.6-2 Schemat sposobu podłączenia manometru różnicowego: 1-badany dyfuzor, 2-sonda, 3-odwodnienie, 4-manometr różnicowy

Rys.6-3 Badane dyfuzory: 1-obudowa, 2-rura PCV, 3-króciec, 4-doprowadzenie powietrza, 5-przegroda porowata, 6-pierścień gwintowany, 7-otwór w obudowie dyfuzora dla dopływu sprężonego powietrza pod przegrodę porowatą, 8-sonda manometru

Rys.6-4 Badany mieszalnik siatkowy: 1-obudowa, 2-siatki, 3-połączenie elementów mieszalnika, 4-kątownik obudowy

Rys.7-1 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla zwilżonego dyfuzora firmy Nokia /napełnienie zbiornika H_{ZB}= 0,12 m/

Rys.7-2 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 0,8 m

Rys.7-3 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m

Rys.7-4 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m

Rys.7-5 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2,35 m

Rys.7-6 Zbiorcza charakterystyka zależności wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów Nokia przy różnych napełnieniach zbiornika

Rys.7-7 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów ze zwilżoną tkaniną PT-48 /H_{ZB}= 0,12 m/

Rys.7-8 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 0,8 m

Rys.7-9 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m

Rys.7-10 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m

Rys.7-11 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2,35 m

Rys.7-12 Zbiorcza charakterystyka zależności wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 przy różnych napełnieniach zbiornika

Rys.7-13 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora ze zwilżoną tkaniną PT-79 /H_{ZB}= 0,12 m/

Rys.7-14 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 0,8 m

Rys.7-15 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m

Rys.7-16 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m

Rys.7-17 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2,35 m

Rys.7-18 Zbiorcza zależność oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-79 przy różnych napełnienia zbiornika

Rys.7-19 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności

napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

Rys.7-20 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB}

Rys.7-21 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

Rys.7-22 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB}

Rys.7-23 Porównanie zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika: 1-dyfuzory z pustą obudową mieszalnika, 2-dyfuzory bez obudowy mieszalnika.

Rys.7-24 Porównanie zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika o różnej wysokości:
1-dyfuzory z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości
2-dyfuzory bez obudowy mieszalnika

Rys.7-25 Porównanie zależności wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika:
1-dyfuzory z pustą obudową mieszalnika
2-dyfuzory bez obudowy mieszalnika

Rys.7-26 Porównanie zależności wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów

współpracujących z obudową mieszalnika o różnej wysokości:
1-dyfuzory z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości
2-dyfuzory bez obudowy mieszalnika

Rys.7-27 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-28 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-29 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB} dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-30 Wybrane zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla układów z mieszalnikiem siatkowym

Rys.7-31 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB} dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-32 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzania sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB} = 2 m i różnej wysokości mieszalnika H_M

Rys.7-33 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzania sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnienia zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

Rys.7-34 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB} = 2 m i różnych wysokości mieszalnika H_M

Rys.7-35 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnienia zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M

Rys.7-36 Zależność wzrostu szybkości wymiany masy na skutek dodatkowego mieszania R od intensywności napowietrzania I oraz rozstawu siatek m w mieszalniku

Rys.7-37 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

Rys.7-38 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB}, dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi

Rys.7-39 Porównanie zależności wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} dla dyfuzorów:
1-z pustą obudową mieszalnika
2-bez obudowy mieszalnika

Rys.7-40 Porównanie zależności wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla dyfuzorów
1-z pustą obudową mieszalnika
2-bez obudowy mieszalnika

Rys.7-41 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m dla zmiennych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-42 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych: napełnieniach zbiornika H_{ZB}, wysokościach mieszalnika H_M i rozstawu siatek m

Rys.7-43 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzania sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB}= 2 m i wysokości mieszalnika H_M

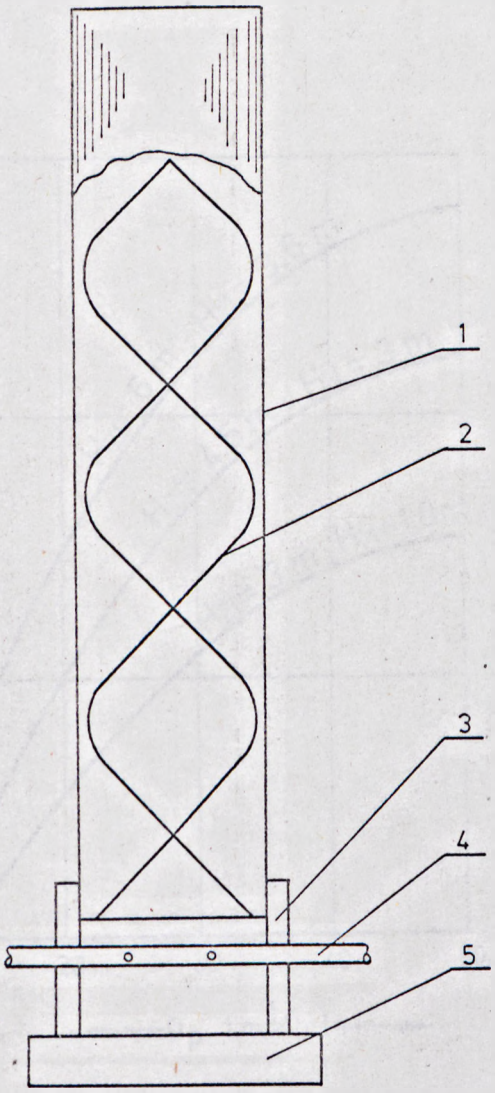
Rys.8-1 Porównanie wybranych badanych aeratorów o najlepszym efekcie działania w zakresie efektywności natleniania

Rys.8-2 Porównanie wybranych badanych aeratorów o najlepszym efekcie działania w zakresie efektywności energetycznej operacji natleniania

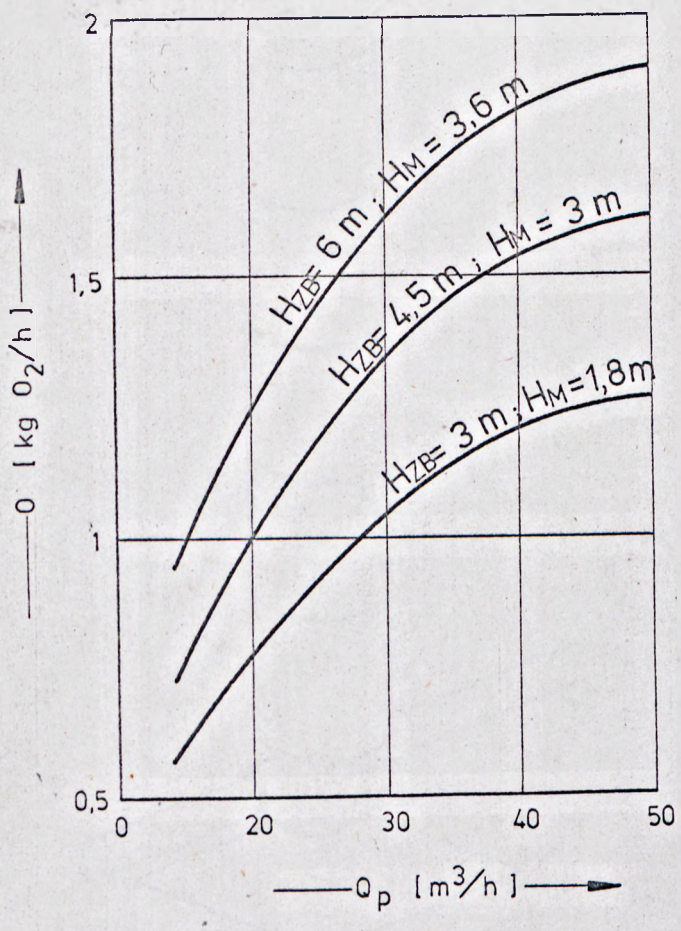
Rys.8-3 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wyhranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 2 m

Rys.8-4 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m

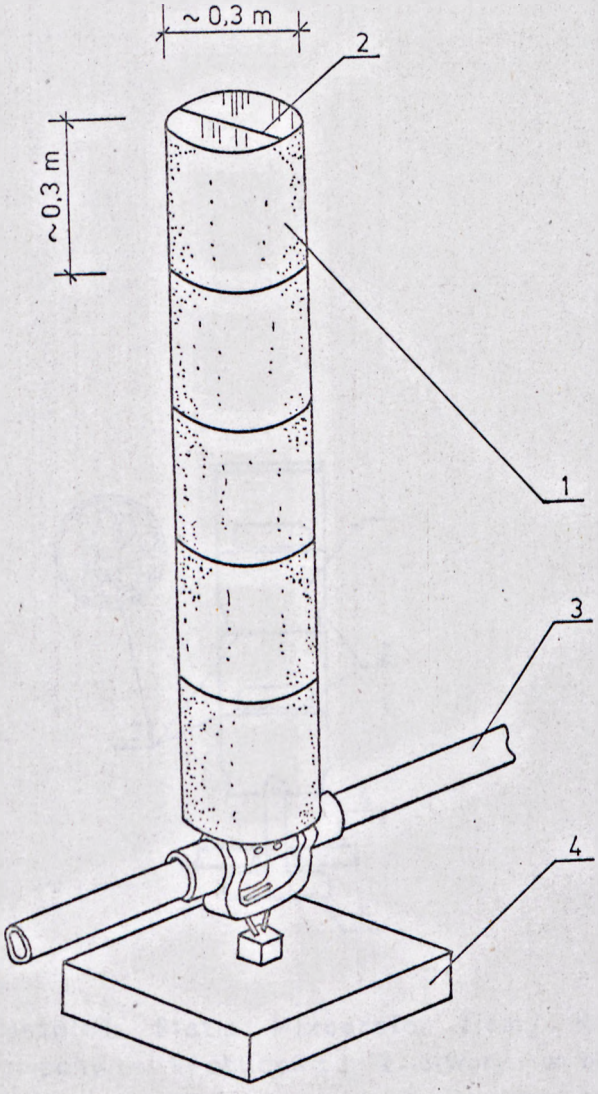
Rys.8-5 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1 m



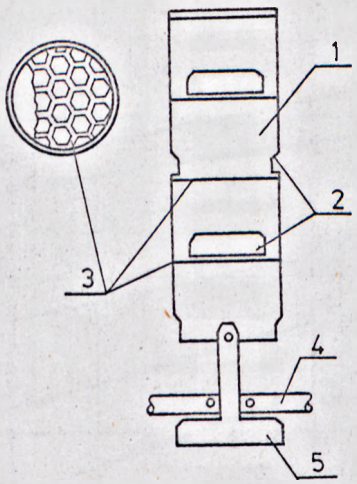
Rys. 3-1. Schemat mieszalnika ślimakowego firmy Polcon: 1-obudowa, 2-ślimacznica, 3-mocowanie, 4-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 5-podstawa (bloczek betonowy)



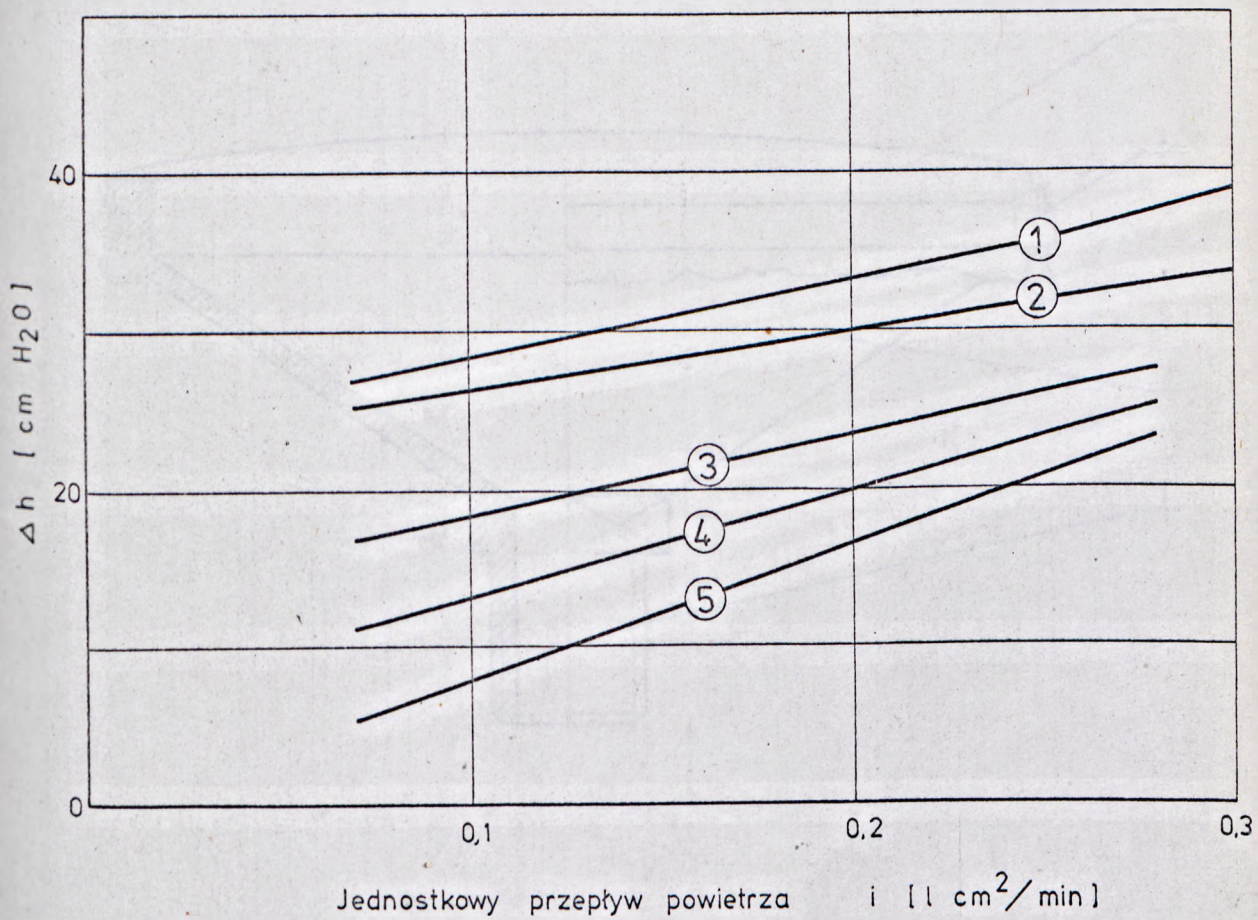
Rys 3-2 Charakterystyka wydajności tlenowej mieszalnika Helixor firmy Polcon.



Rys. 3-3 Mieszalnik firmy Kenics : 1 - elementy obudowy, 2 - przegroda, 3 - przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 4 - podstawa (bloczek betonowy)

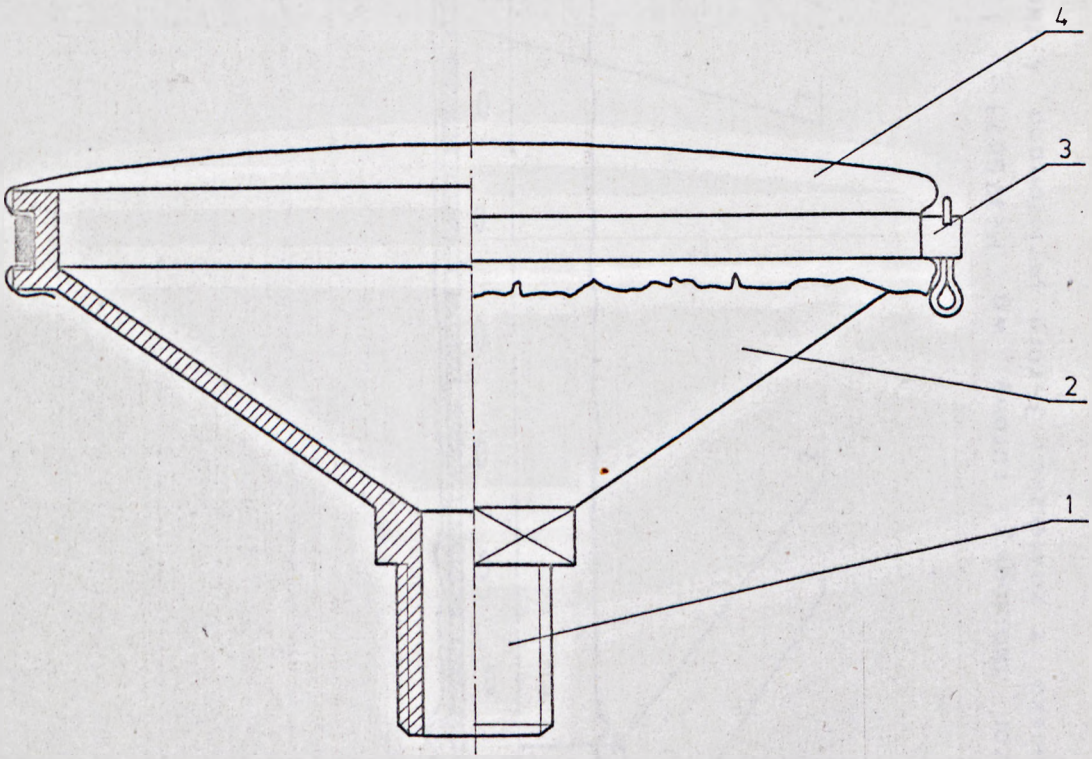


Rys. 3-4. Mieszalnik Static Mixoerator firmy Ralph B. Carter Company: 1 - obudowa, 2 - otwory w obudowie, 3 - przegrody, 4 - przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 5 - podstawa.

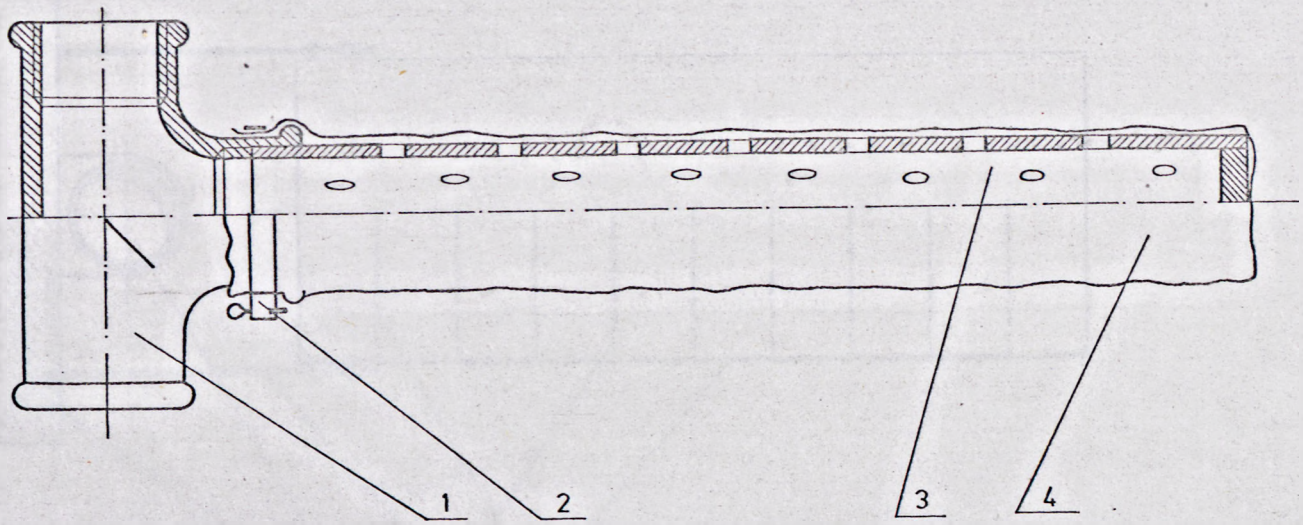


Rys 4-1 Porównanie oporów tkanin z innymi materiałami filtrosowymi wg badań radzieckich [24]:

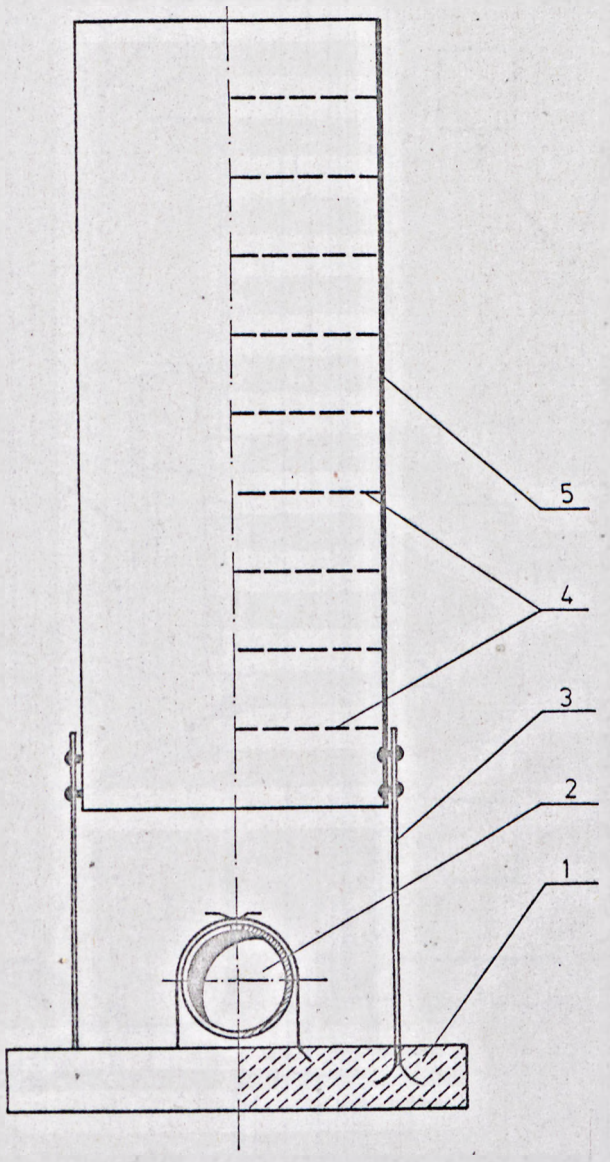
1 – tkanina Nr 56 007
2 – tkanina Nr 1 520
3 – tkanina Nr 56 026
4 – płytka filtrosowa
5 – rura ceramiczna 500 ϕ mm



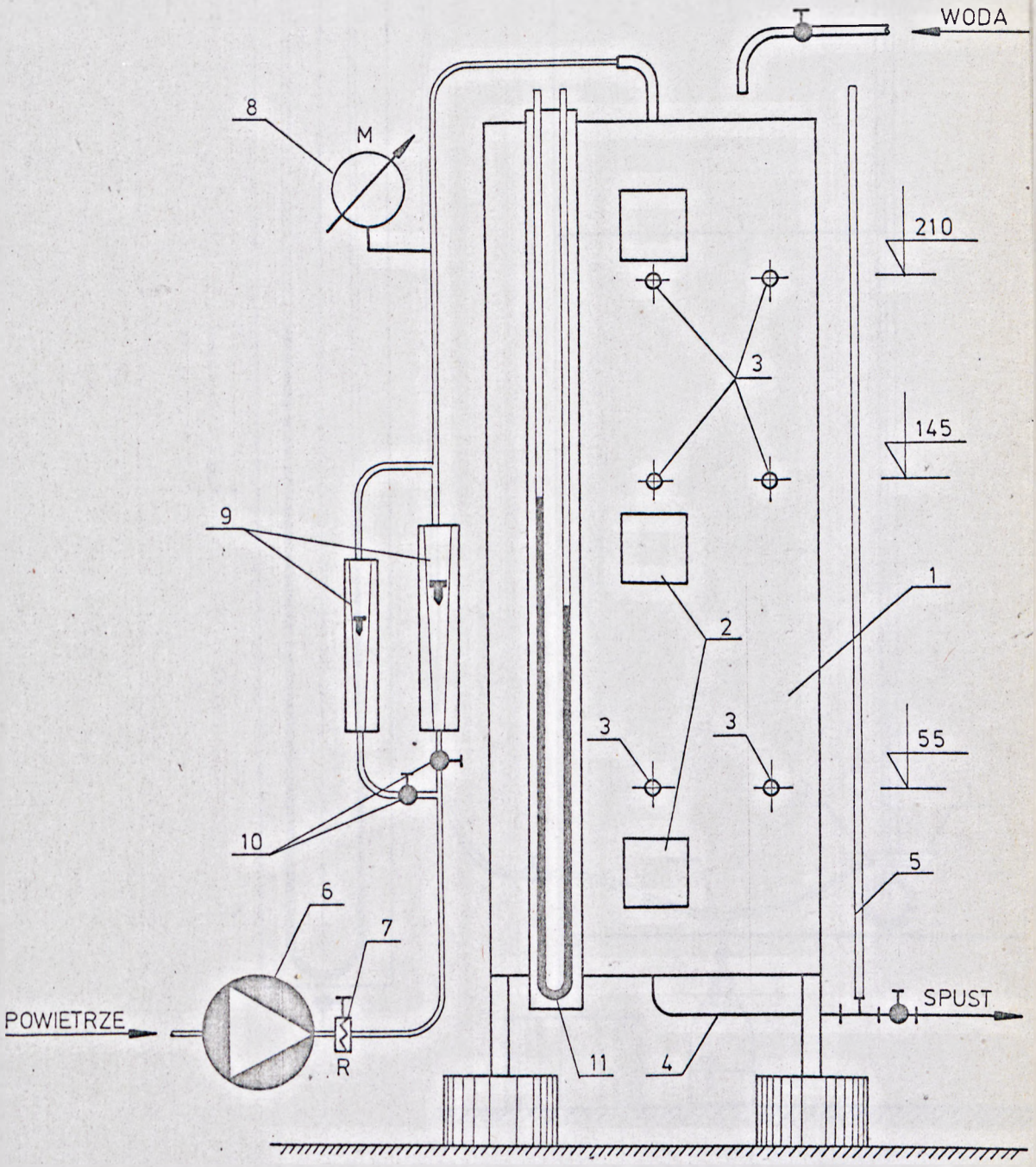
Rys. 4-2. Dyfuzor tkaninowy dyskowy wg P 175873: 1 - króciec z gwintem, 2 - obudowa, 3 - opaska z zawleczką, 4 - tkanina.



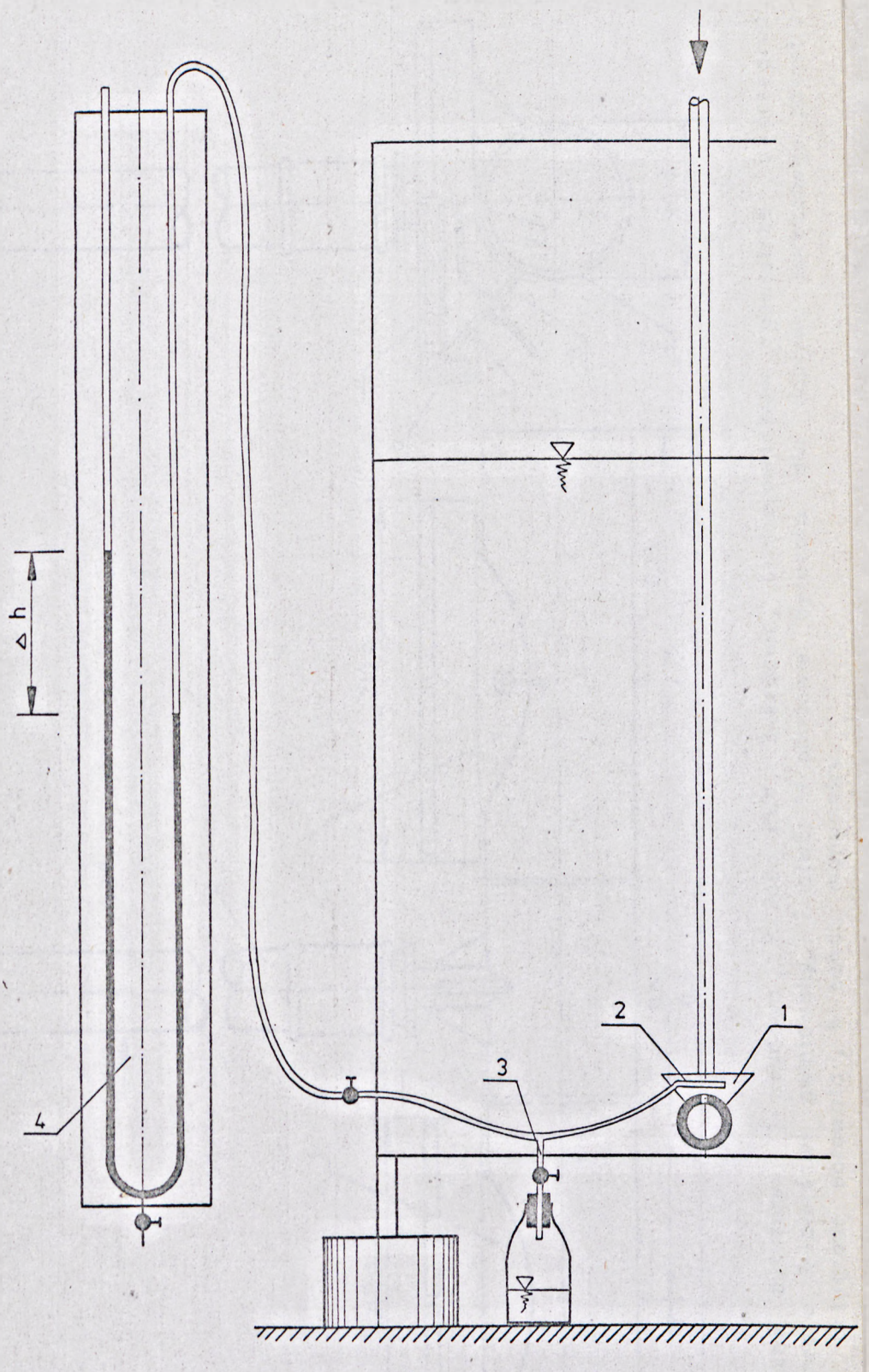
Rys. 4-3 Dyfuzor tkaninowy rurowy wg P-175873 : 1 – trójnik, 2 – opaska z zawleczką, 3 – rura perforowana, 4 – tkanina.



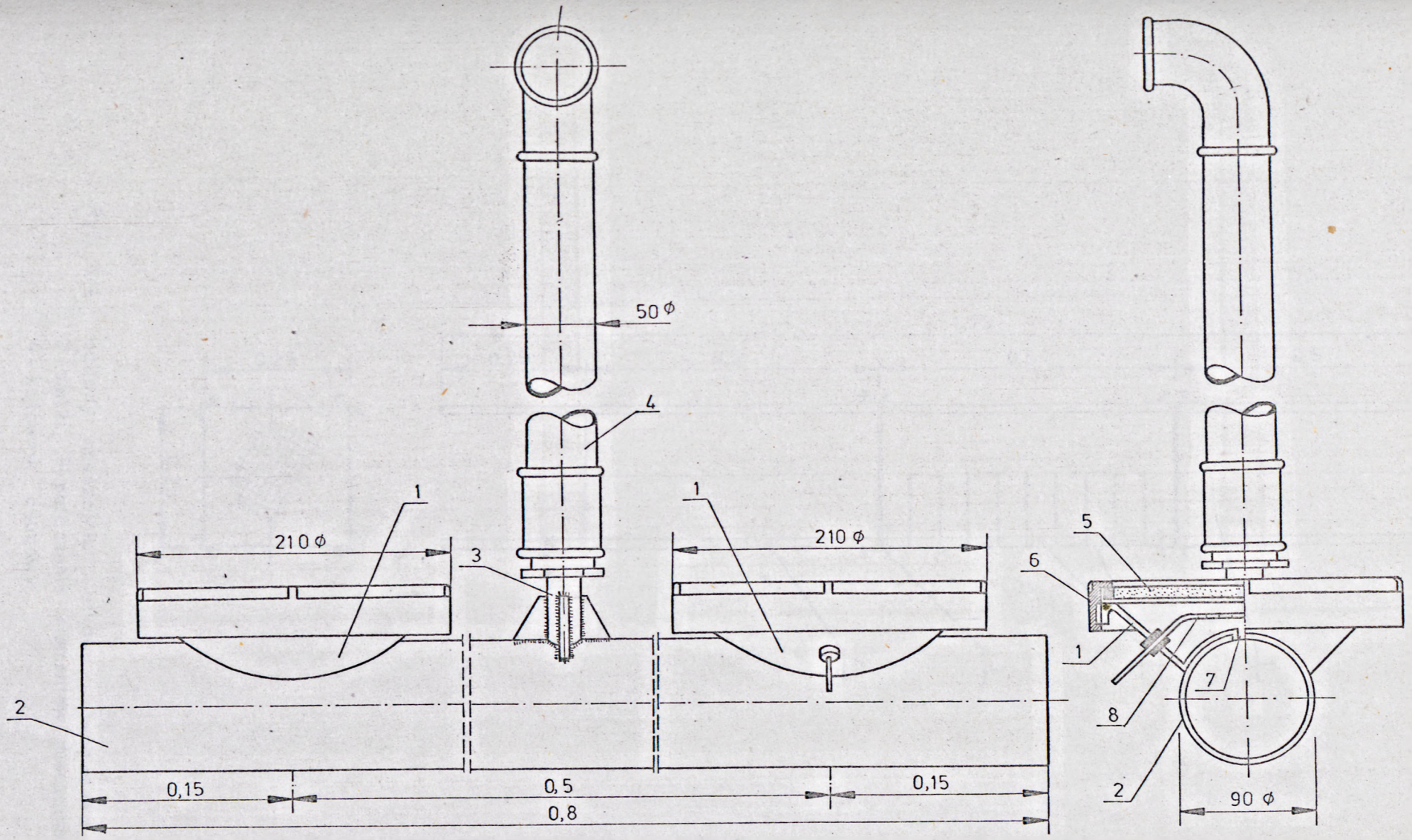
Rys. 4-4. Mieszalnik siatkowy wg P-200673: 1-płytka betonowa, 2-przewód rozdzielczy sprężonego powietrza, 3-nogi, 4-siatki, 5-obudowa.



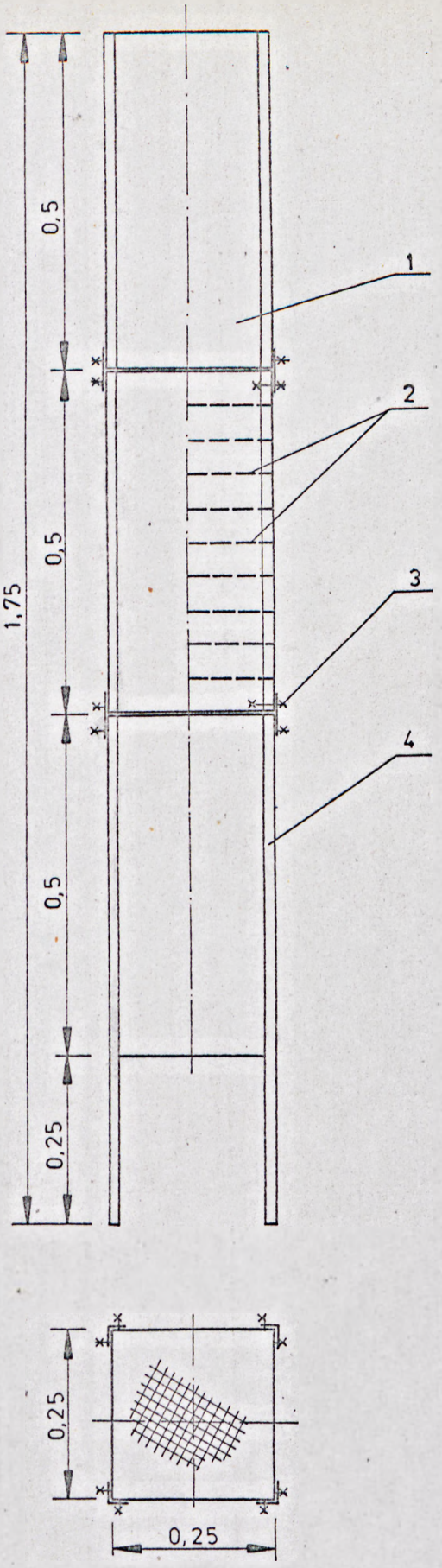
Rys. 6-1. Schemat stanowiska badawczego: 1-zbiornik, 2-okna szkła organicznego, 3-króćce do poboru prób wody, 4-spust, 5-wodowskaz, 6-sprężarka, 7-zawór redukcyjny, 8-manometr mechaniczny, 9-rotametry, 10-zawory, 11-manometr różnicowy.



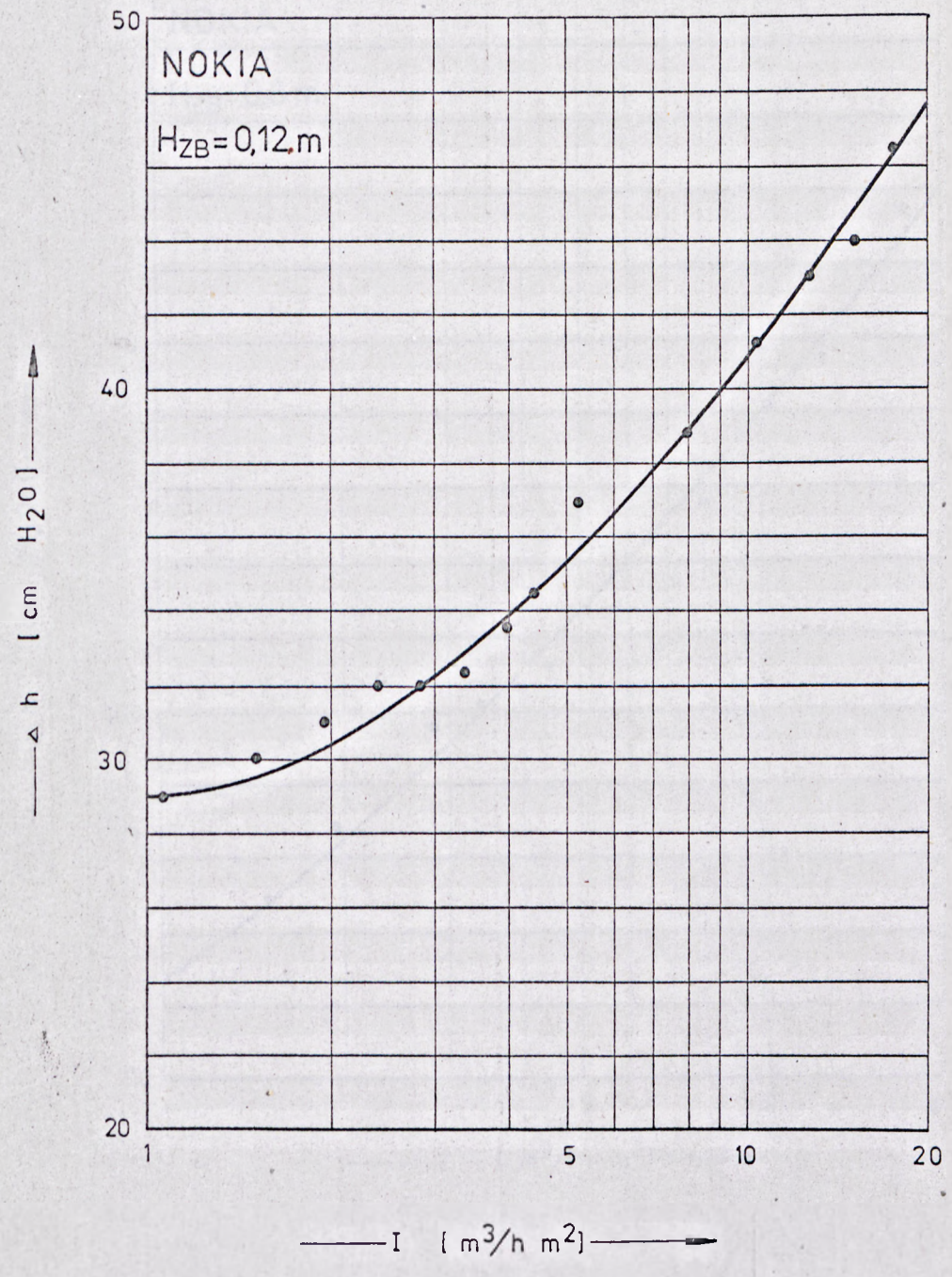
Rys. 6-2. Schemat sposobu podłączenia manometru różnicowego : 1 - badany dyfuzor, 2-sonda, 3- odwodnienie , 4 - manometr różnicowy.



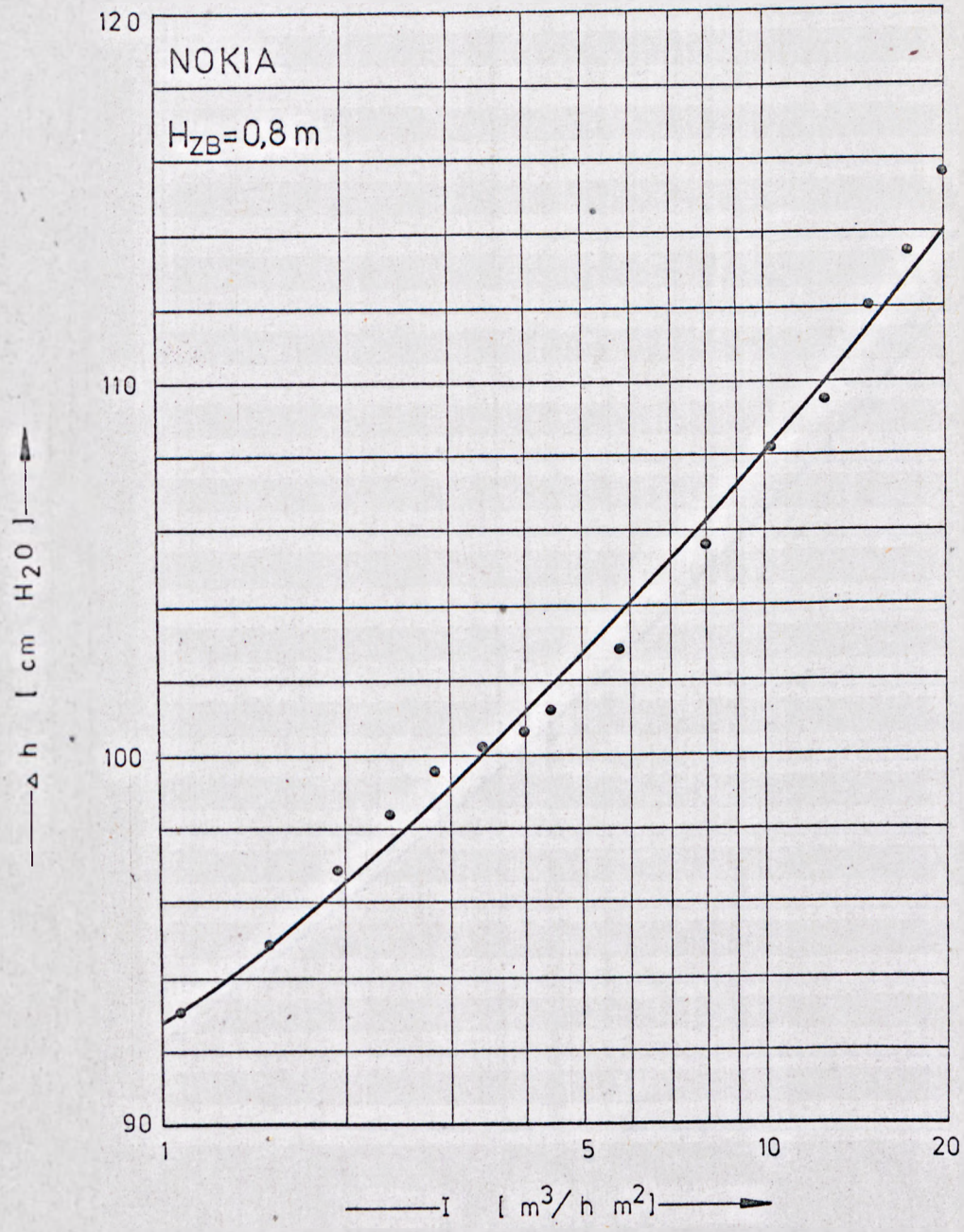
Rys. 6-3. Badane dyfuzory: 1- obudowa, 2-rura PCV, 3-króciec, 4-doprowadzenie powietrza, 5-przegroda porowata, 6-pierścień gwintowany, 7- otwór w obudowie dyfuzora dla dopływu sprężonego powietrza pod przegrodę porowatą, 8-sonda manometru



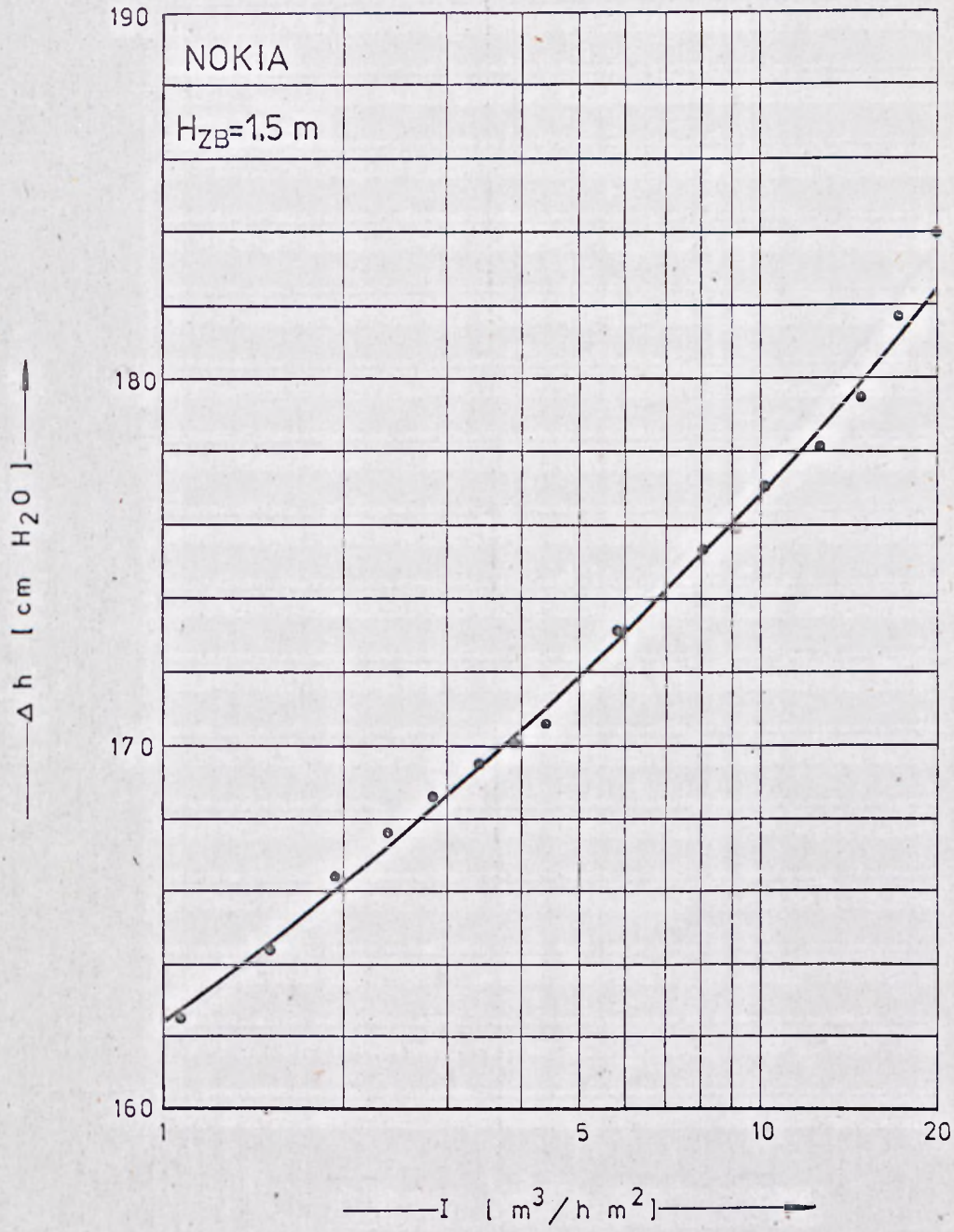
Rys. 6-4. Badany mieszalnik siatkowy: 1-obudowa, 2-siatki, 3-połączenie elementów mieszalnika, 4-kątownik obudowy.



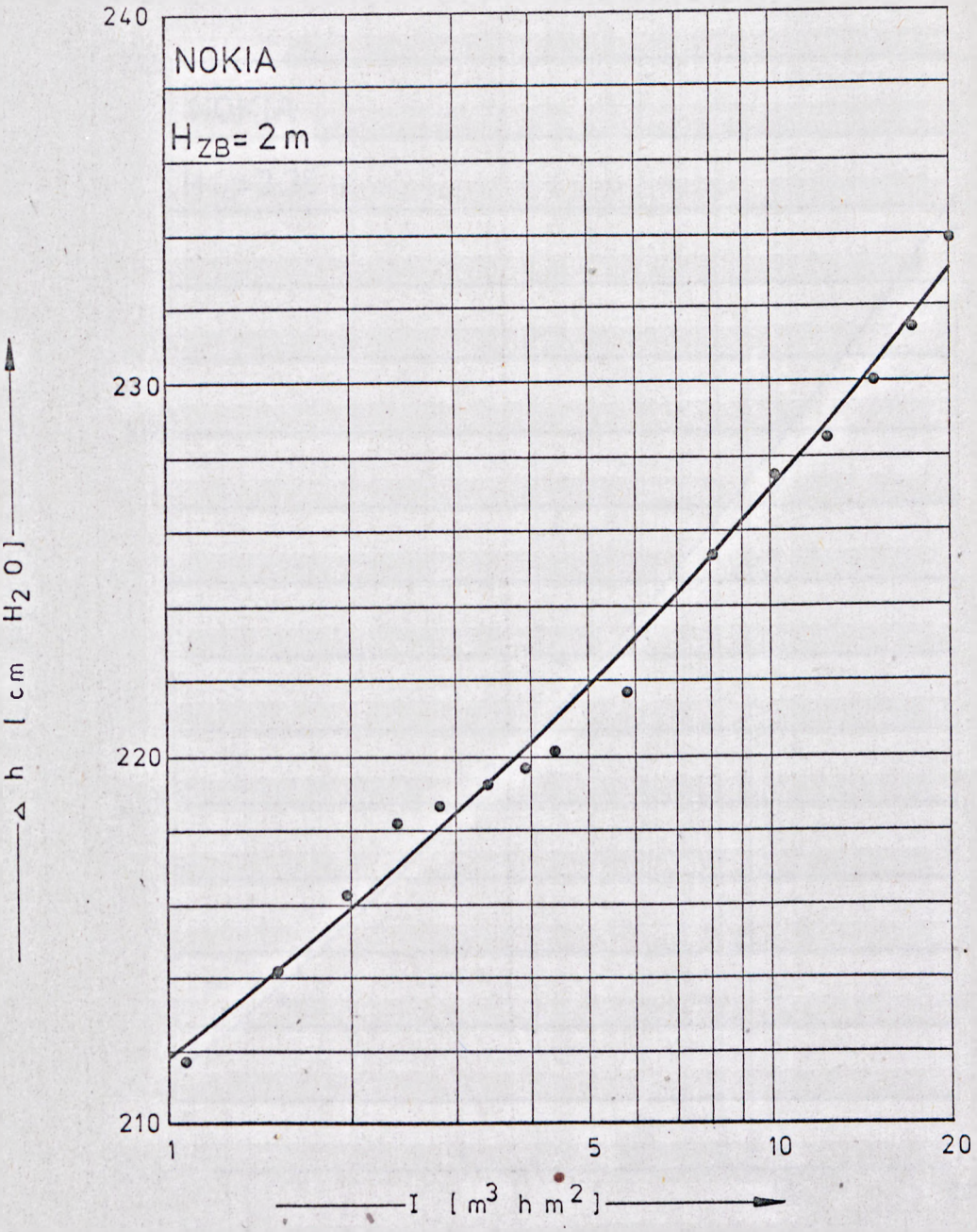
Rys. 7-1. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla zwilżonego dyfuzora firmy Nokia (napełnienie zbiornika H_{ZB}=0,12 m)



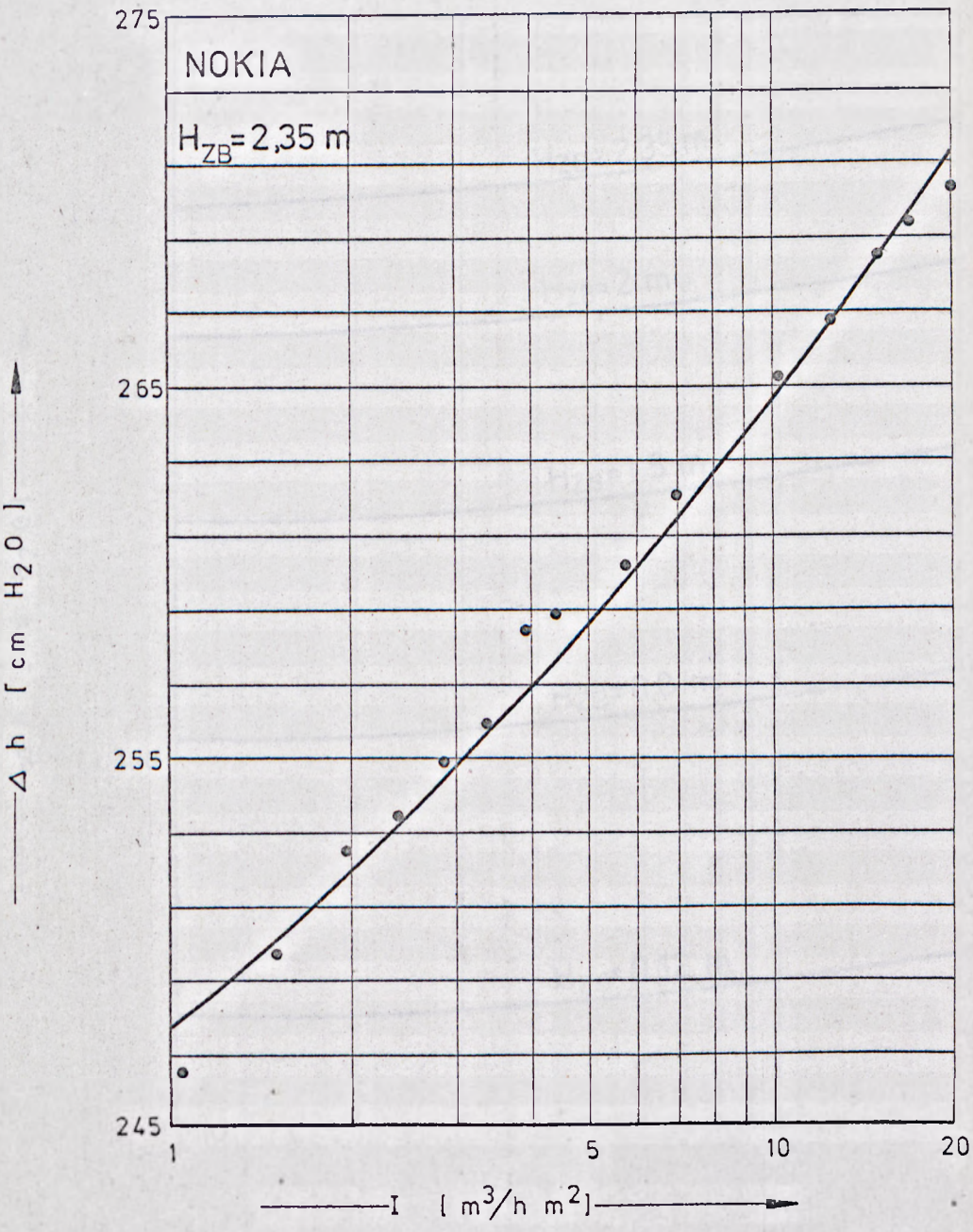
Rys. 7-2. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia , przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=0,8 m



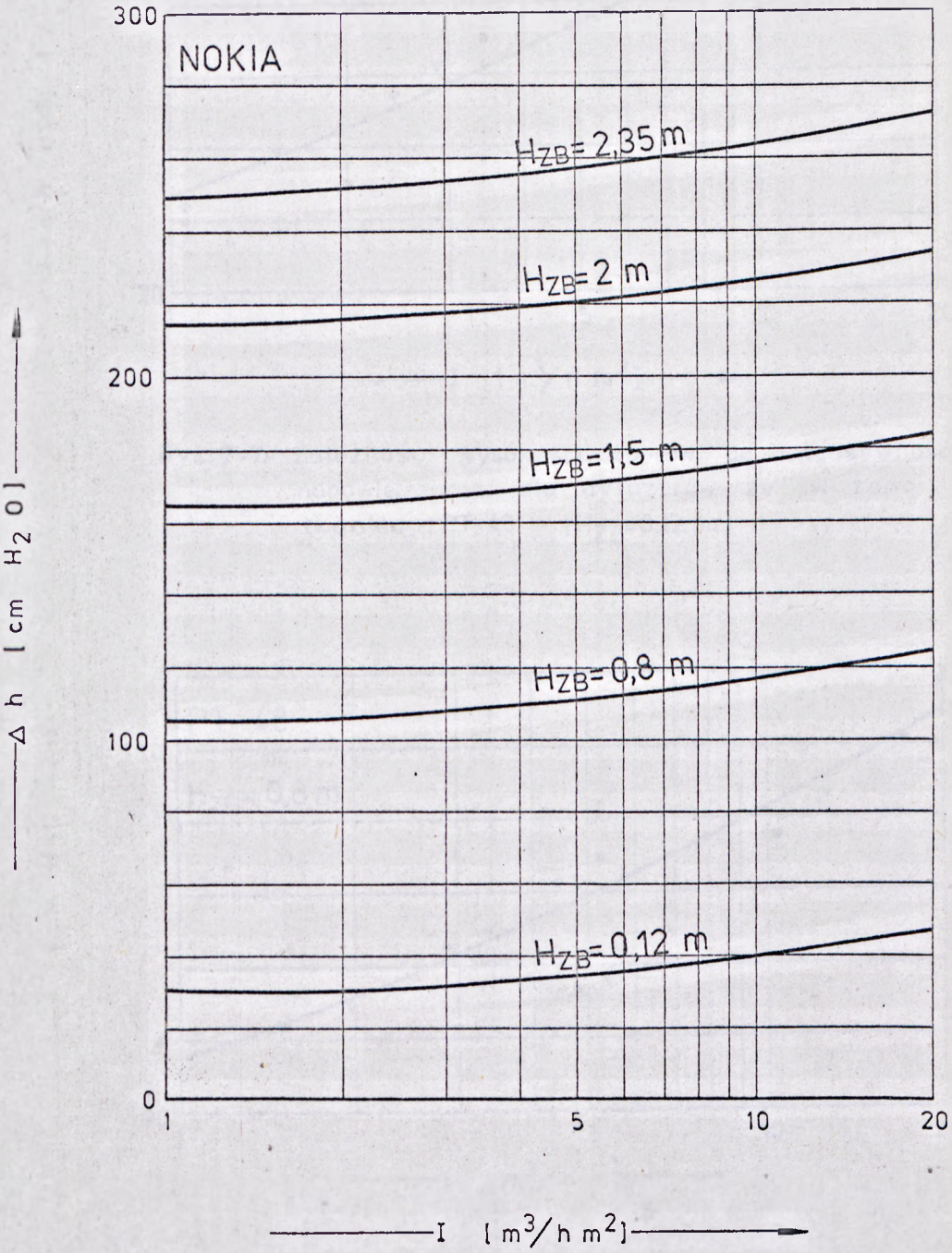
Rys. 7-3 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dyfuzora Nokia przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=1,5 m.



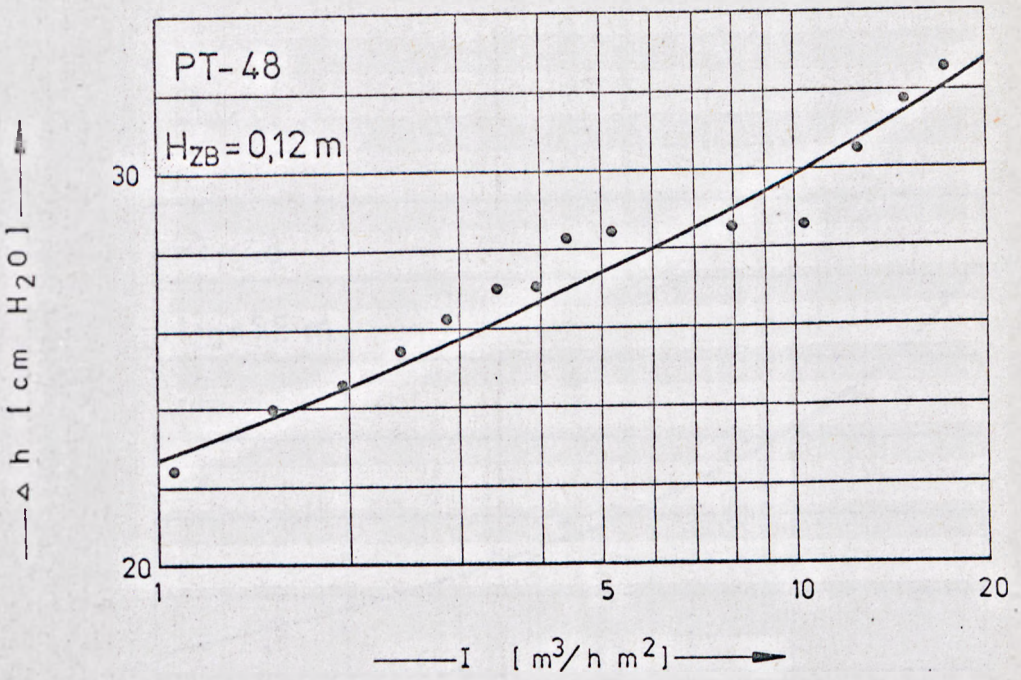
Rys. 7-4. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m



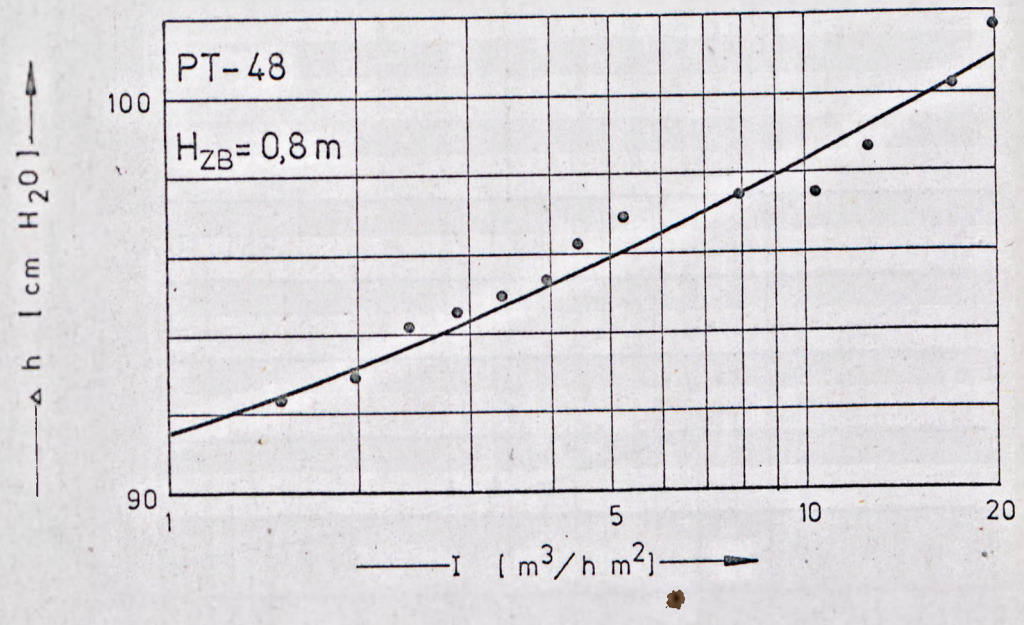
Rys.7-5. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora Nokia przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2,35 m.



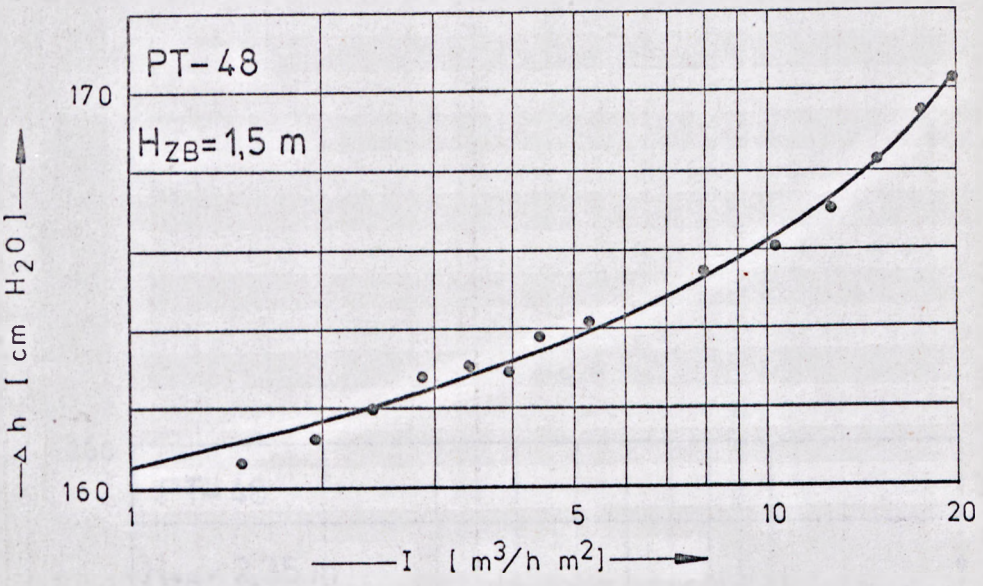
Rys. 7-6 Zbiorcza charakterystyka zależności wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów Nokia, przy różnych napełnieniach zbiornika.



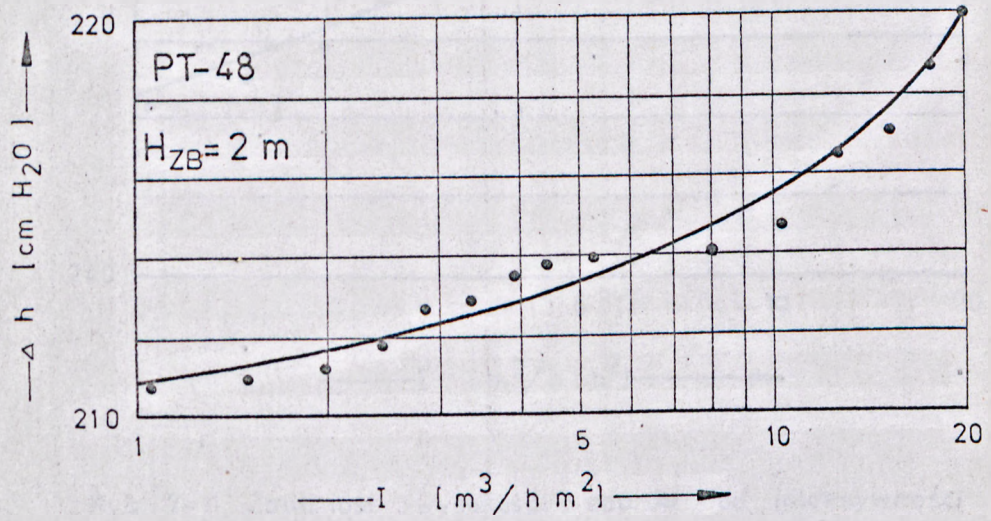
Rys. 7-7. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów ze zwilżoną tkaniną PT-48 (H_{ZB}=0,12 m)



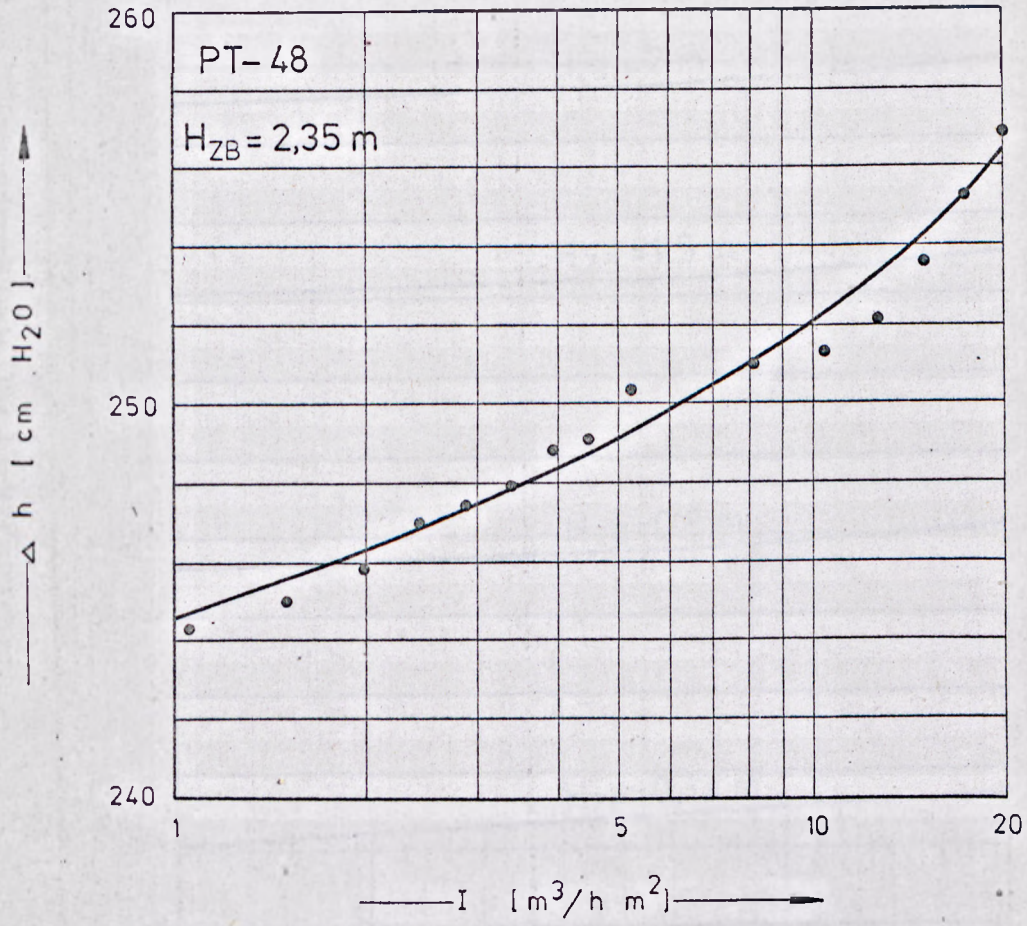
Rys. 7-8. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=0,8 m.



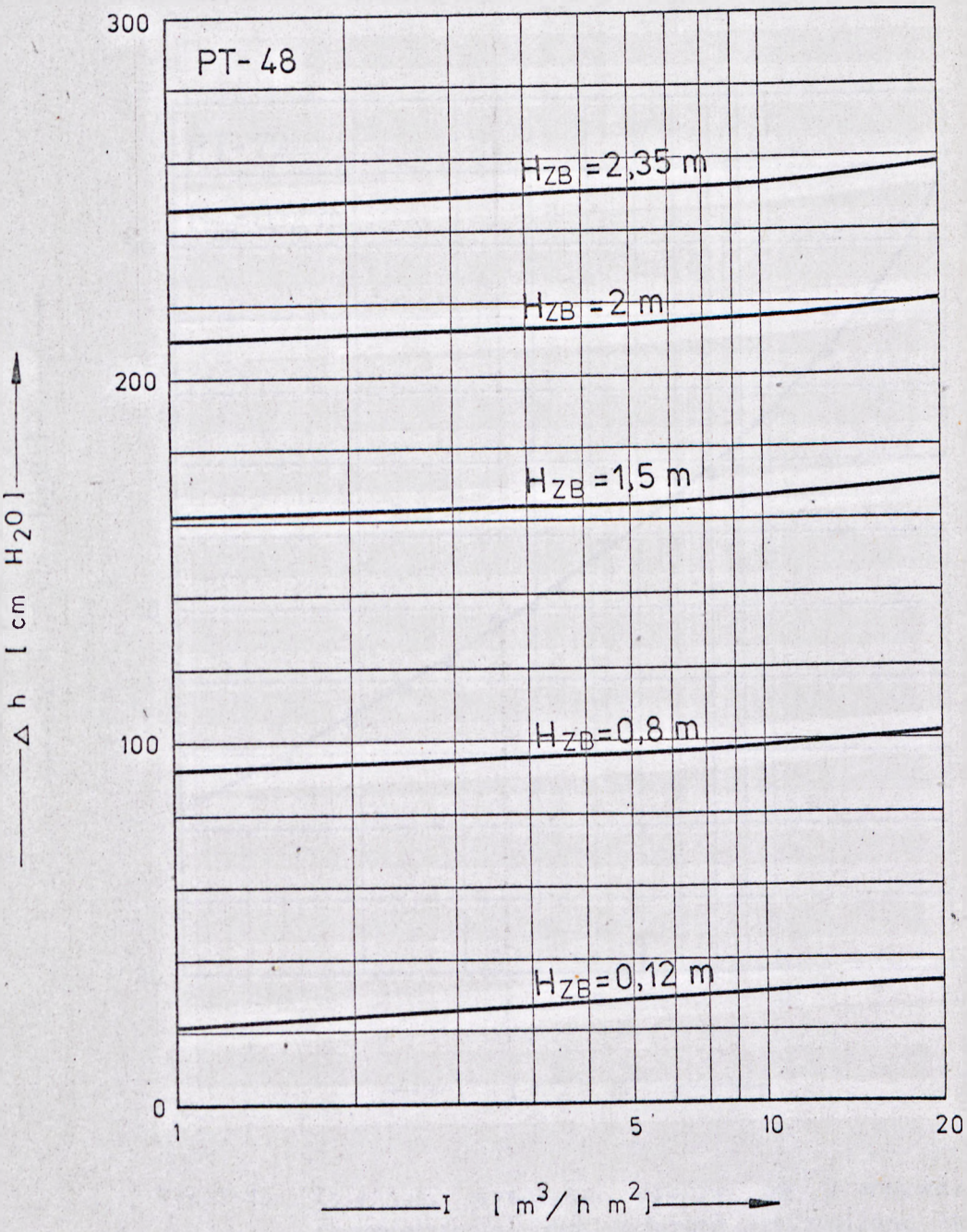
Rys. 7–9 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=1,5 m.



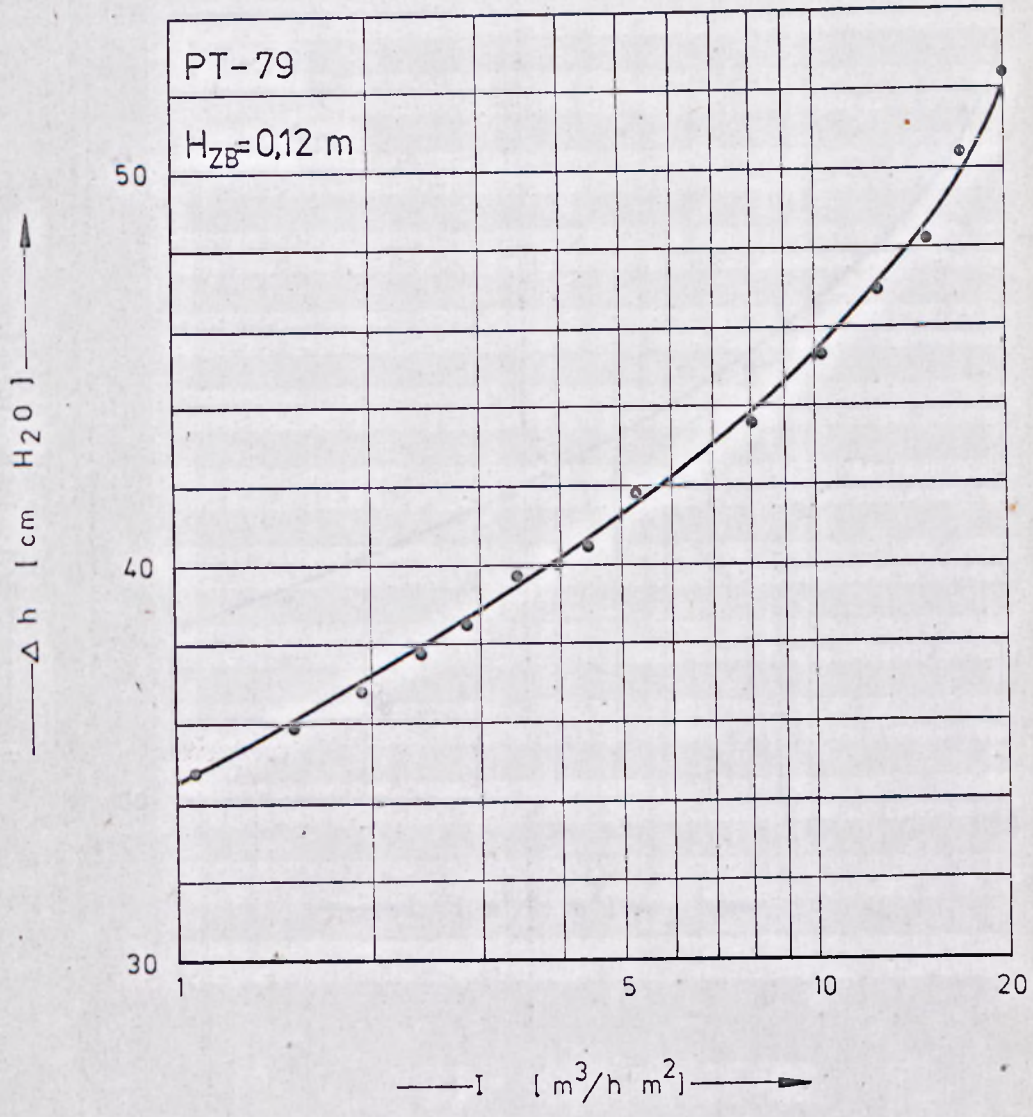
Rys. 7–10 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m



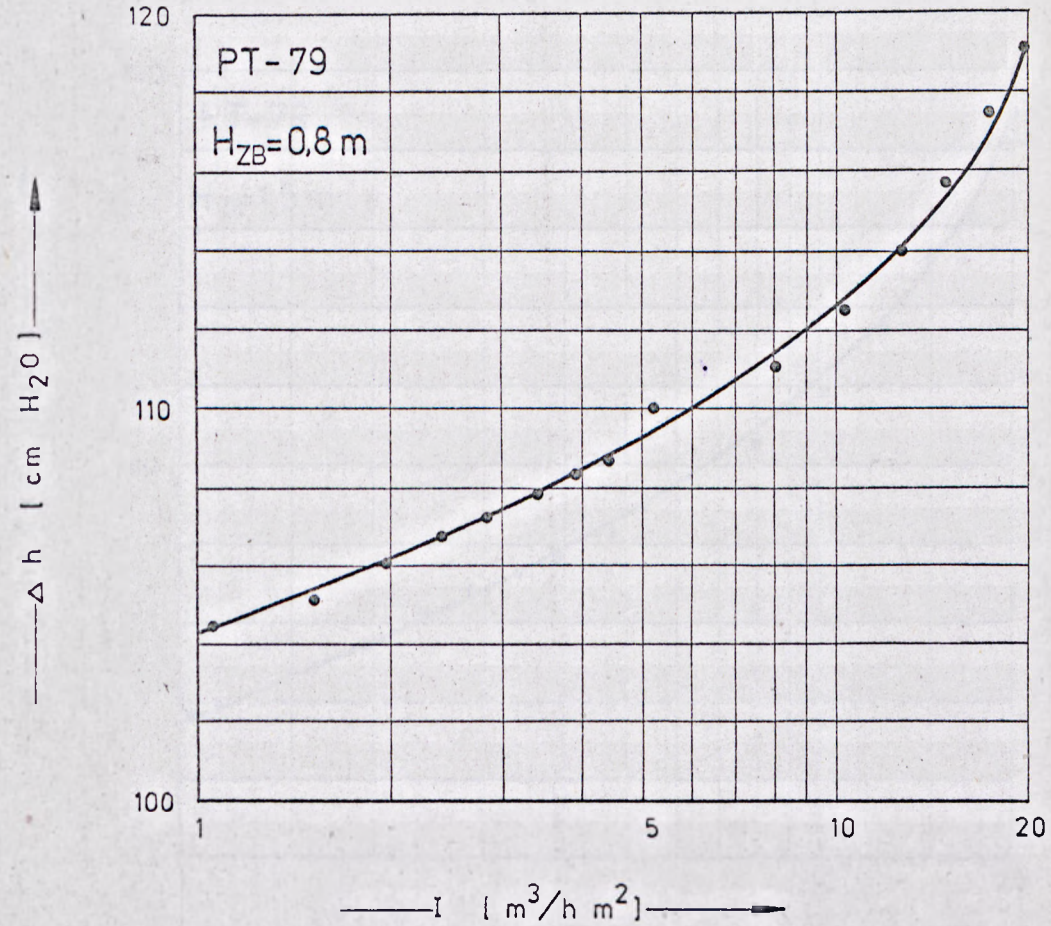
Rys. 7-11 Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną, PT-48, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2,35 m.



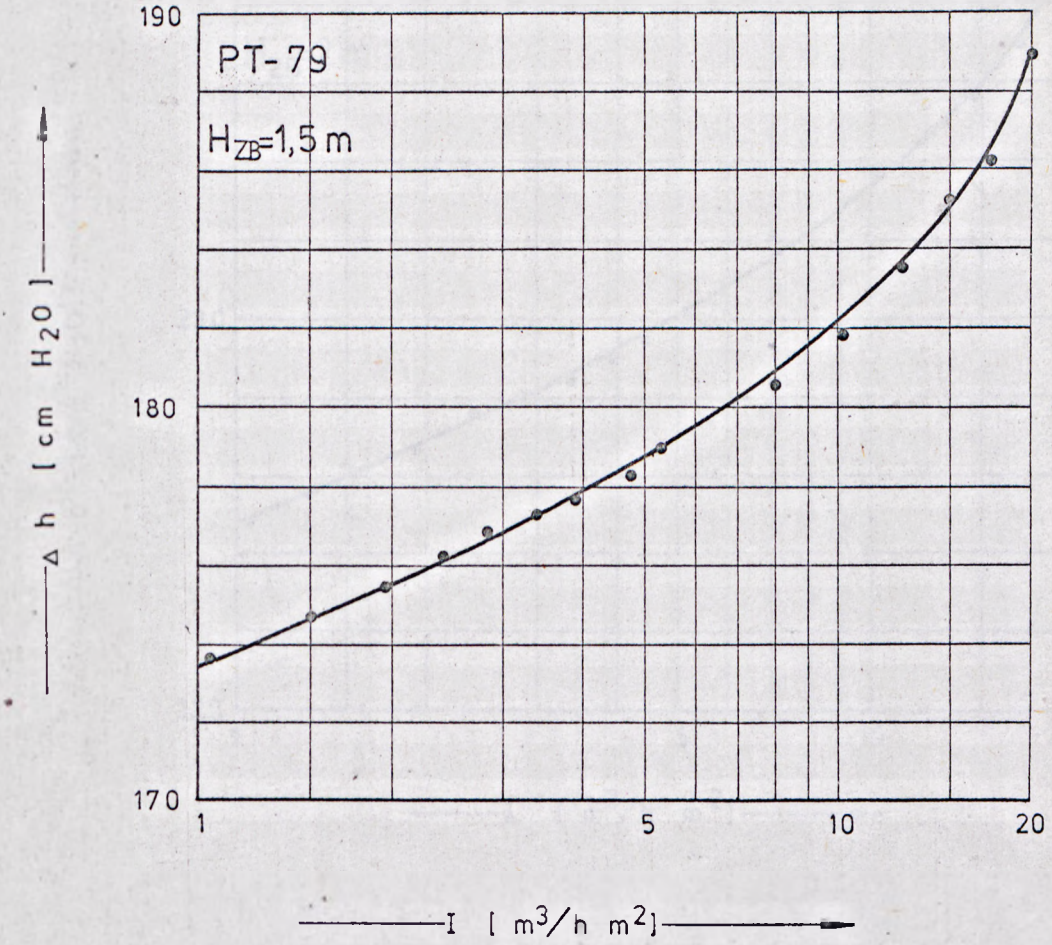
Rys. 7-12. Zbiorcza charakterystyka wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-48 , przy różnych napełnieniach zbiornika.



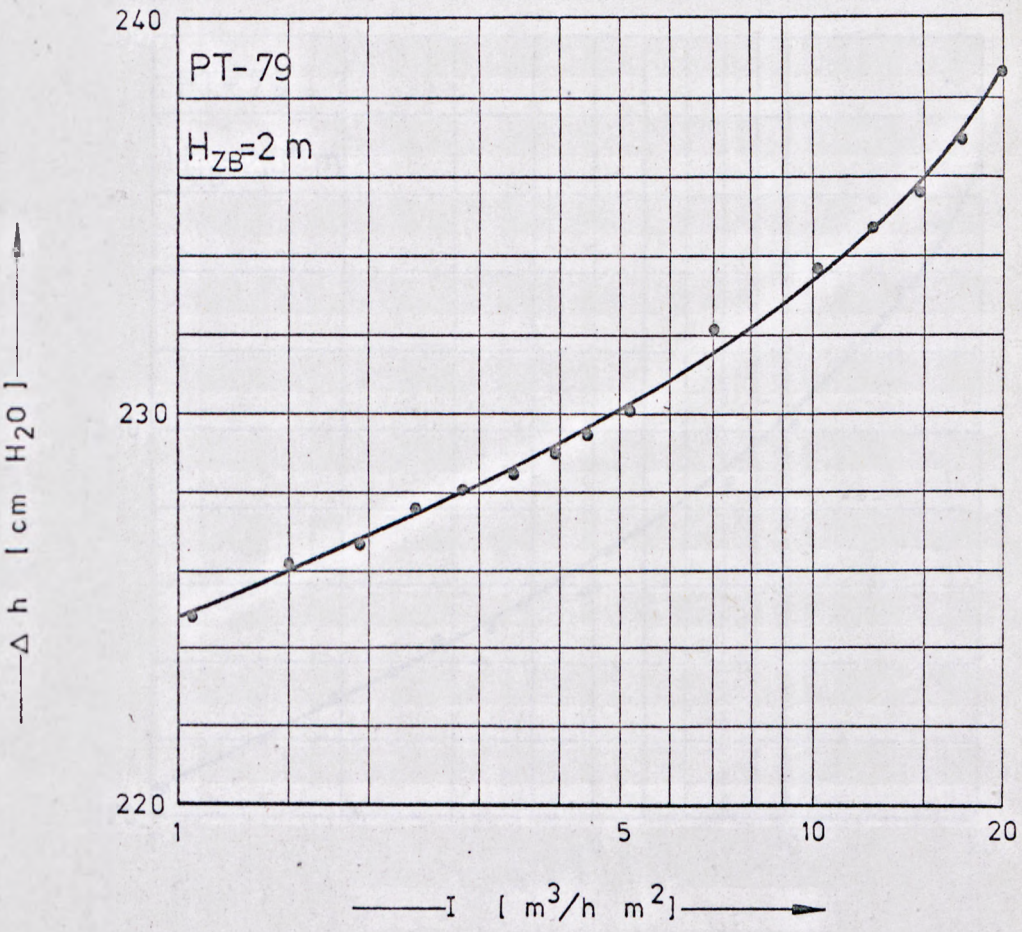
Rys. 7-13. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora ze zwilżona, tkanina, PT-79 (H_{ZB}= 0 12 m)



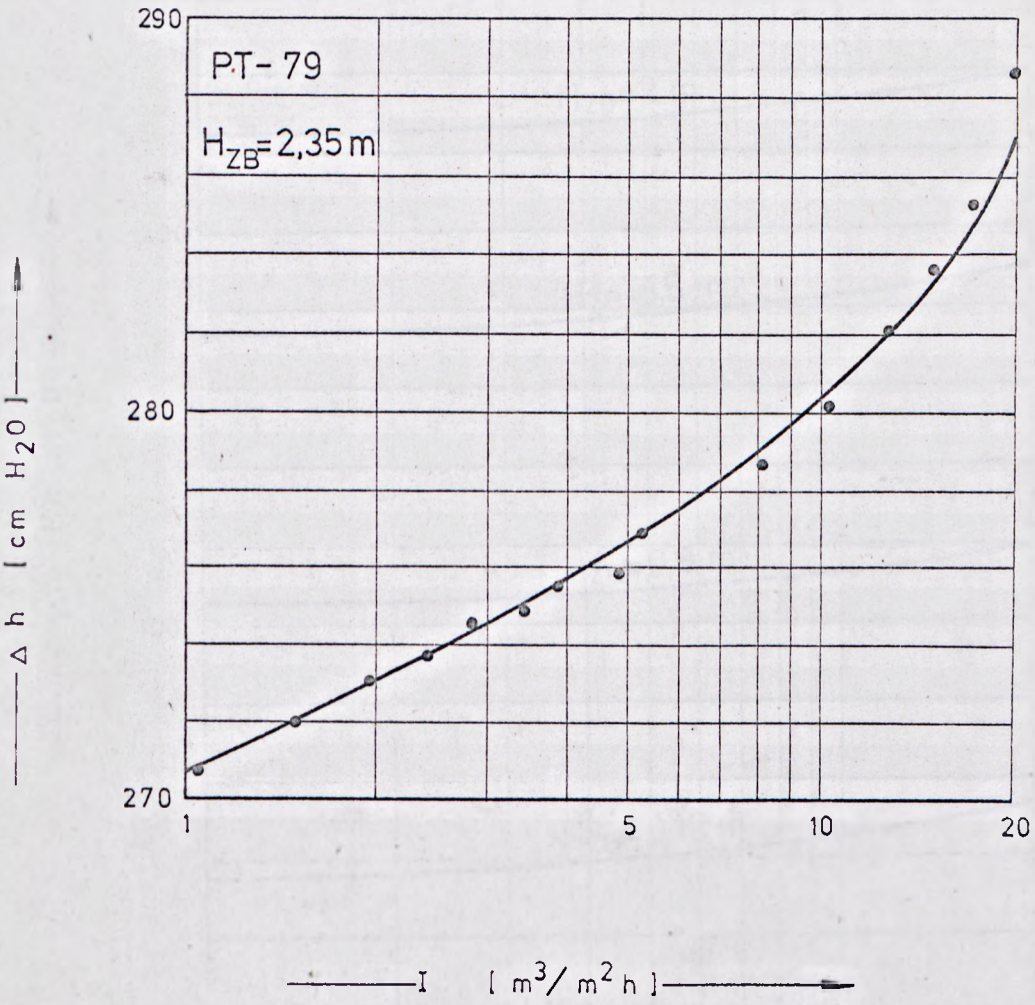
Rys. 7-14. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79 przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=0,8 m



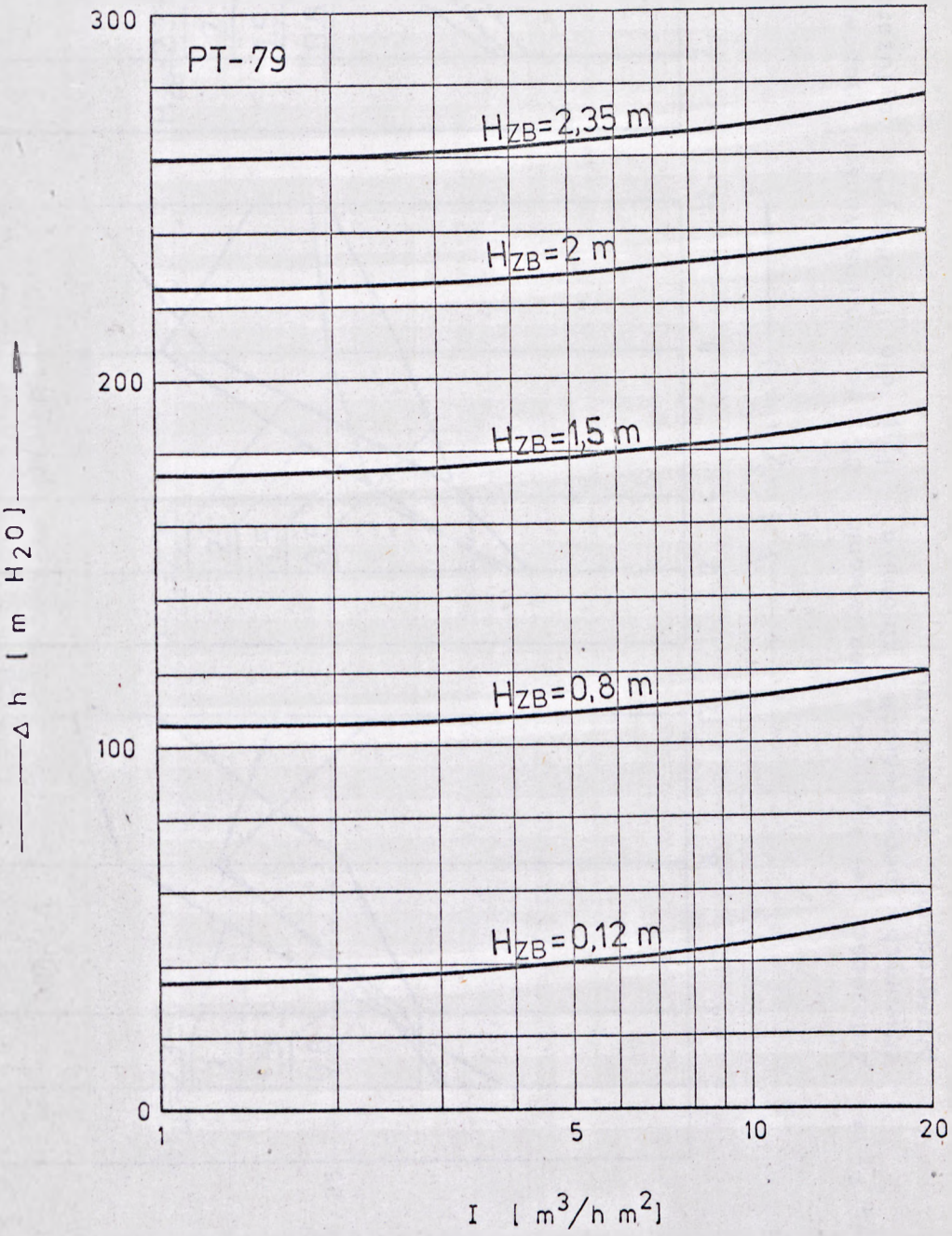
Rys. 7-15. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=1,5 m.



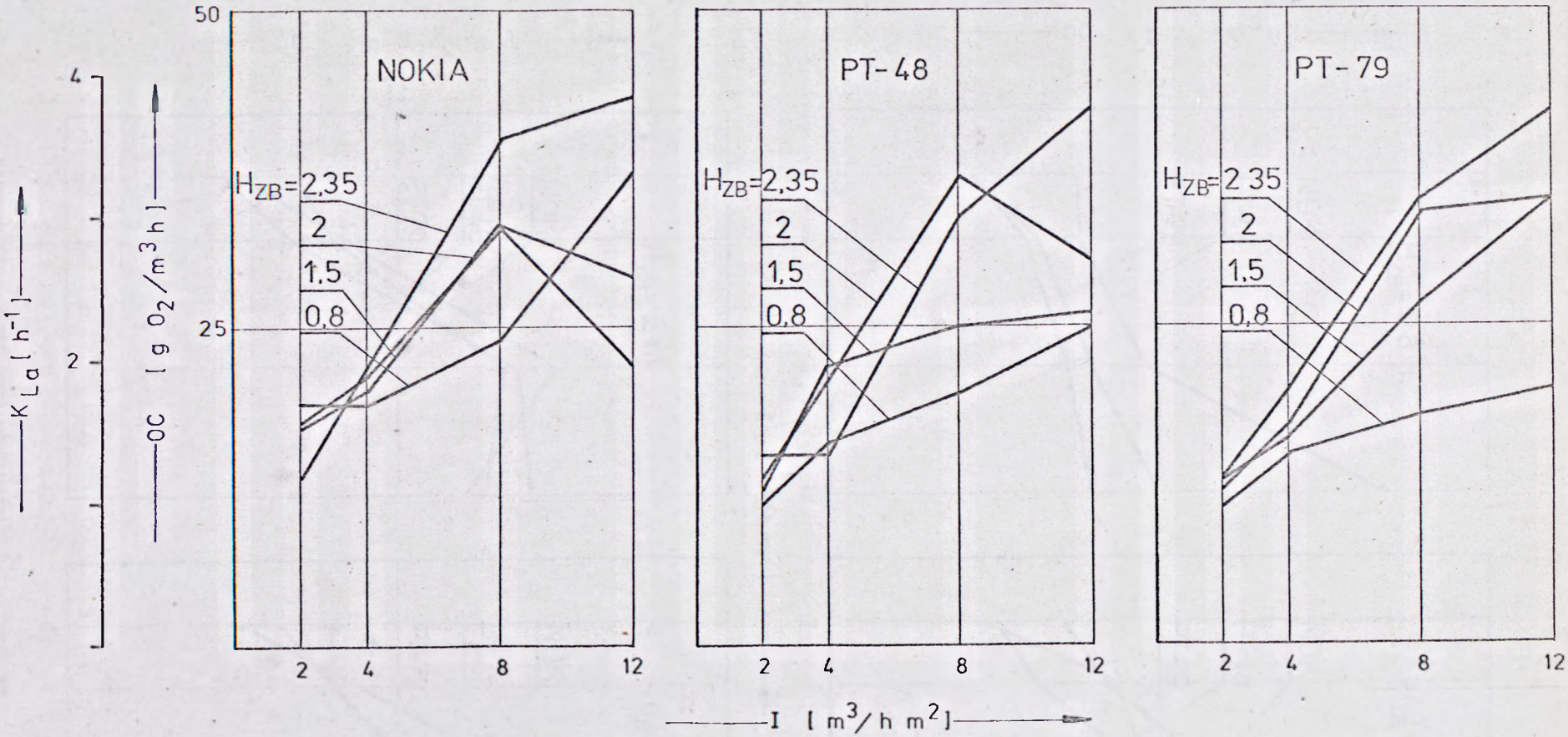
Rys. 7-16. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkaniną PT-79, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2 m.



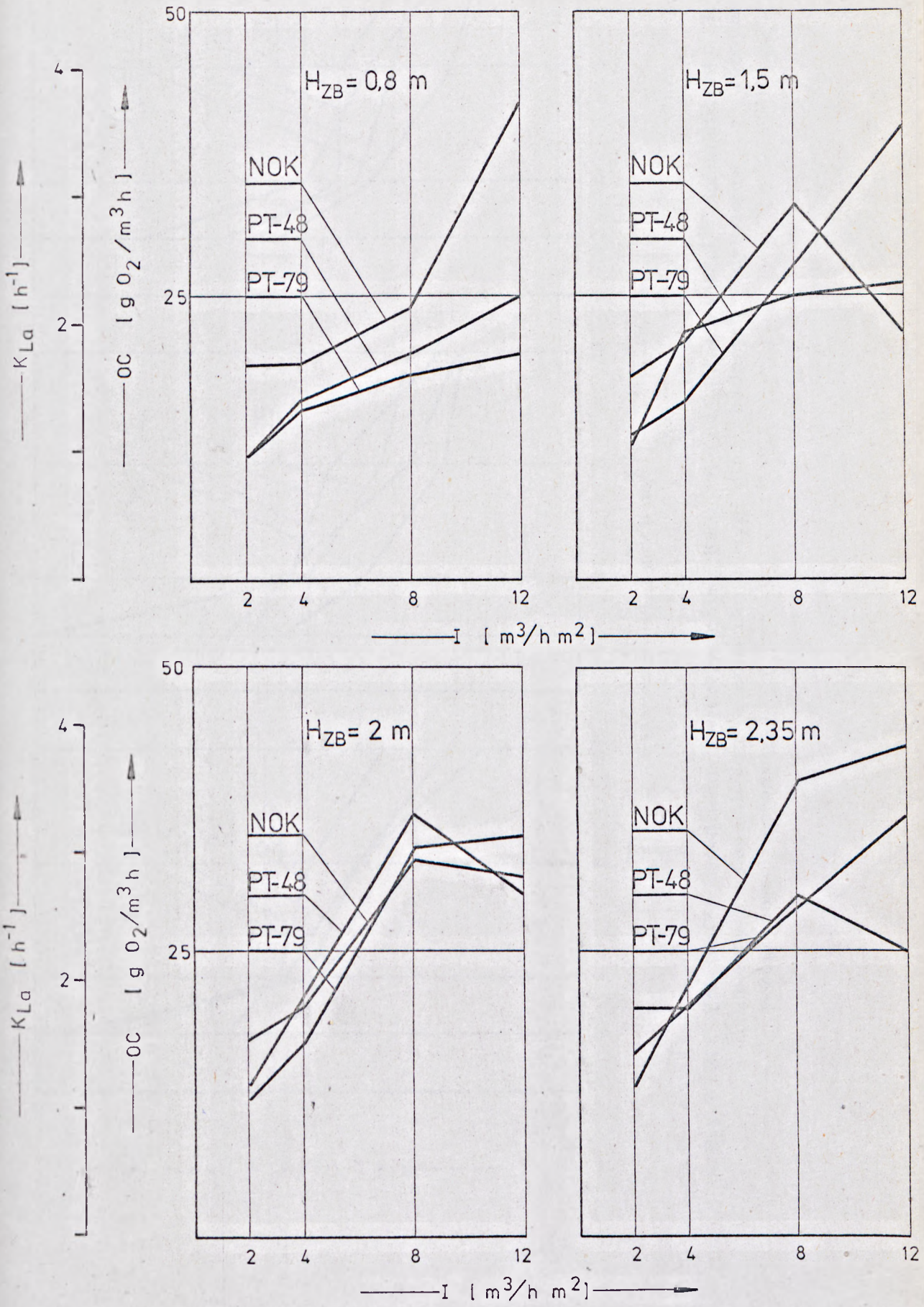
Rys. 7 – 17. Zależność wysokości oporów od intensywności napowietrzania dla dyfuzora z tkanina, PT-79, przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2,35 m



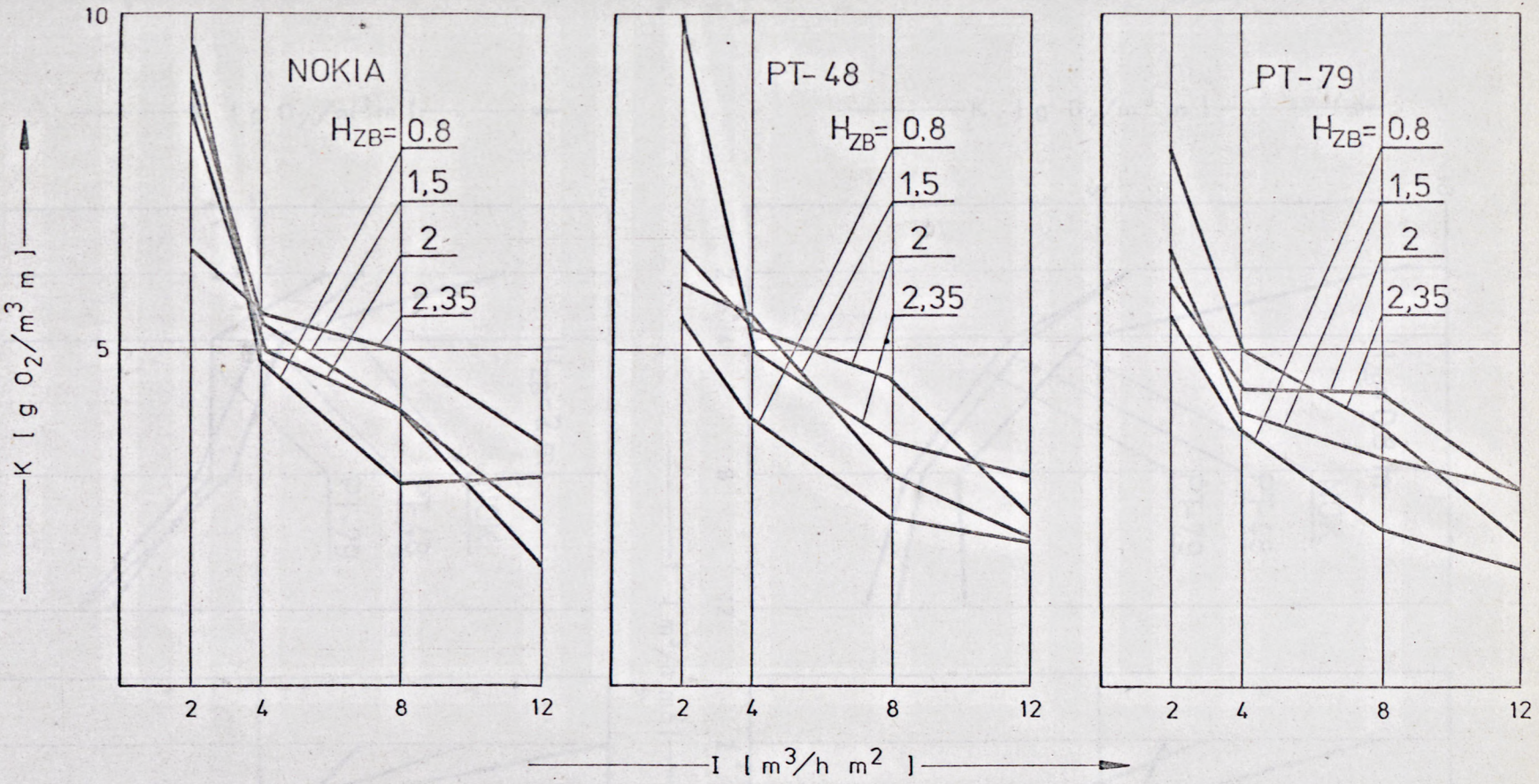
Rys. 7–18. Zbiorcza charakterystyka zależności wysokości oporów hydraulicznych od intensywności napowietrzania dla dyfuzorów z tkaniną PT-79 przy różnych napełnieniach zbiornika.



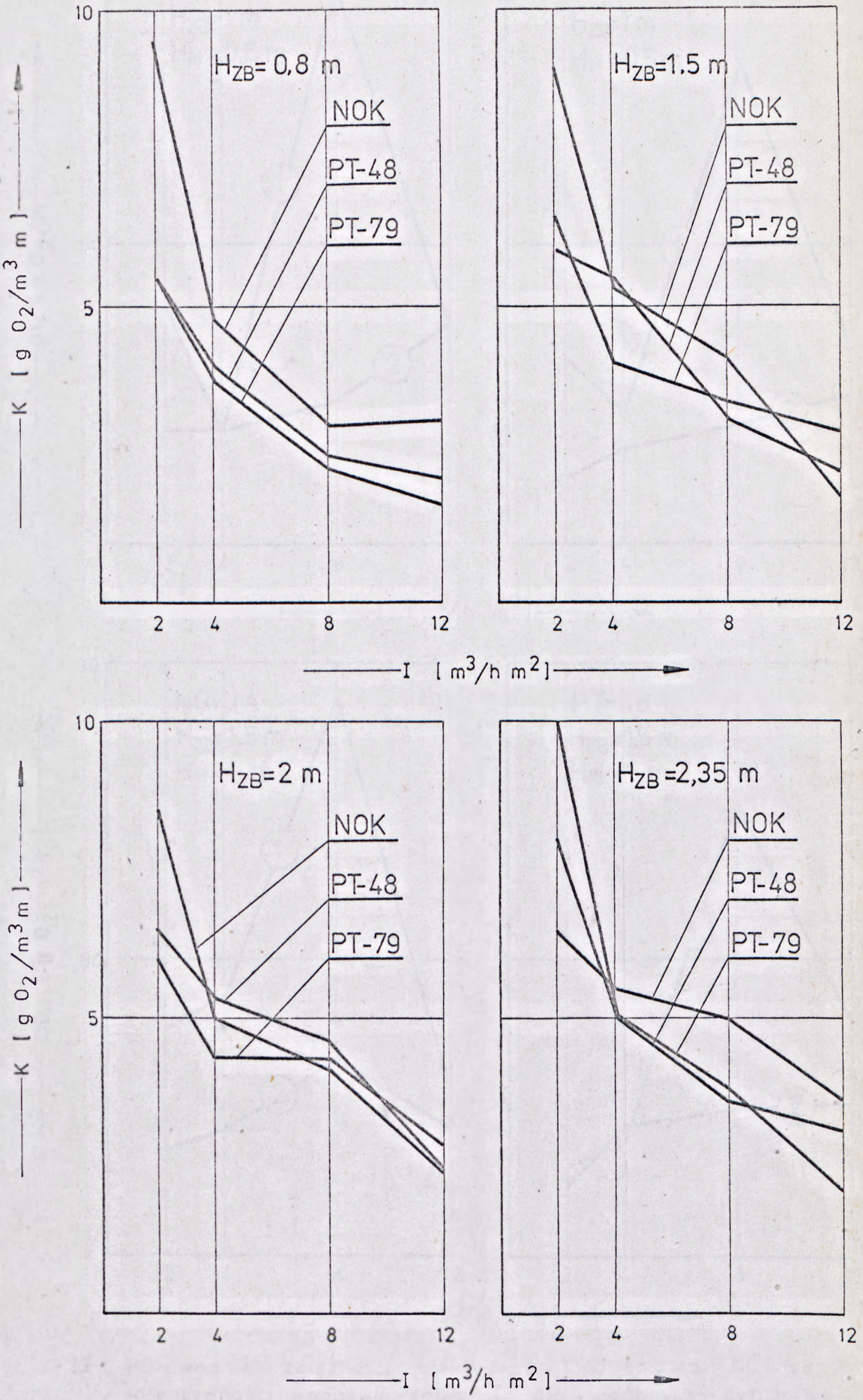
Rys. 7-19 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.



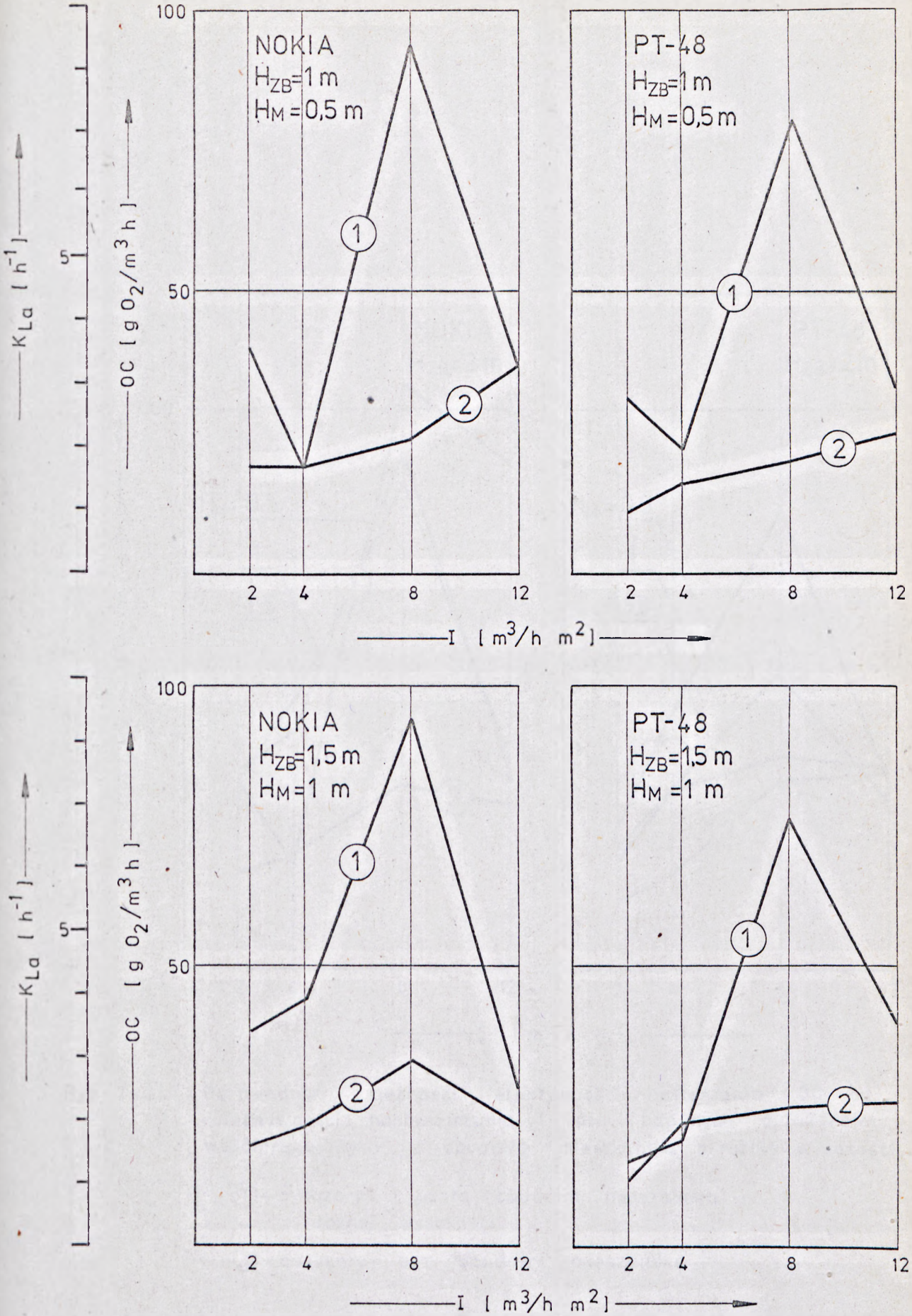
Rys. 7 - 20. Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB}.



Rys. 7 – 21 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.

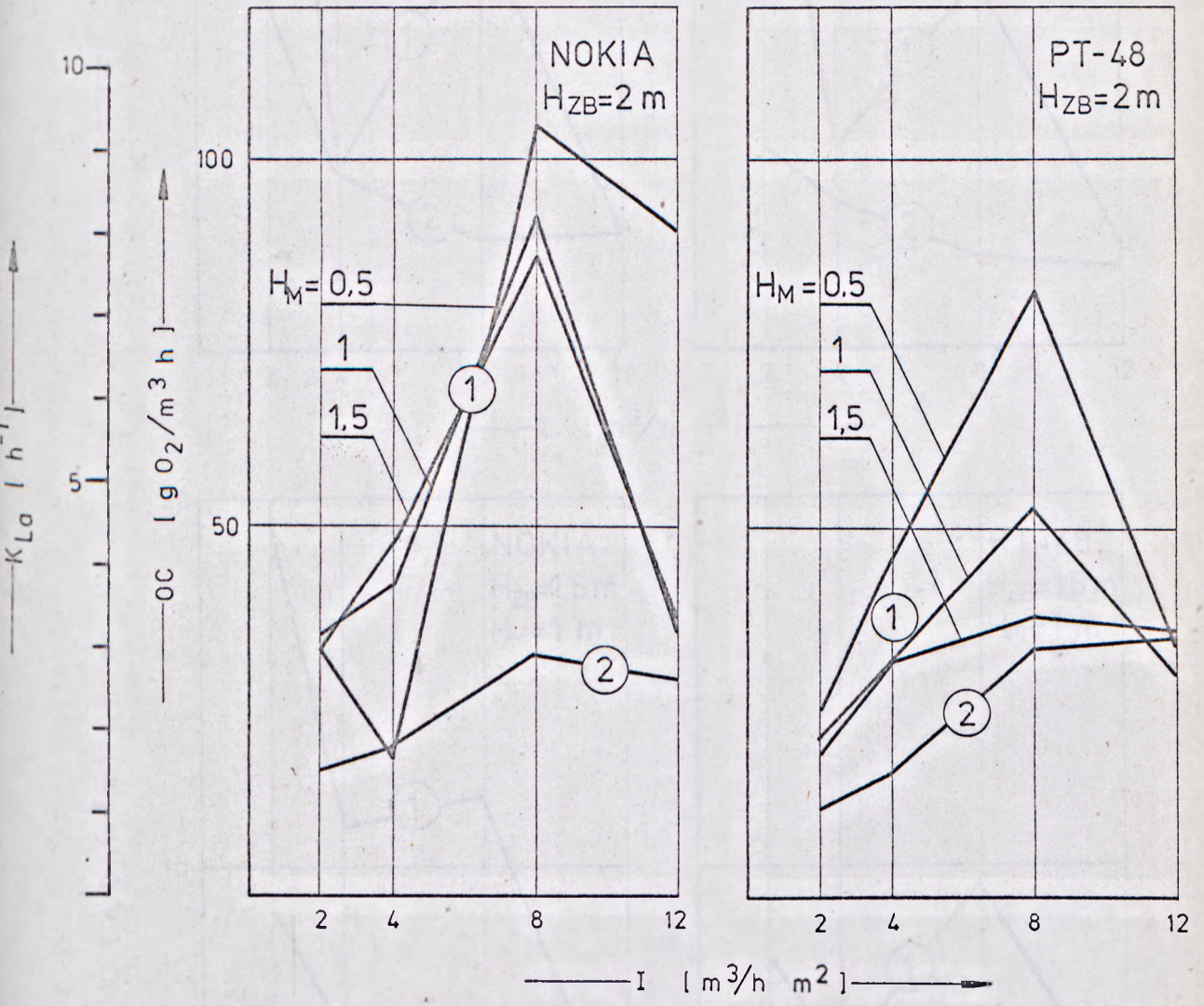


Rys. 7-22 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB}.



Rys. 7-23 Porównanie zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika

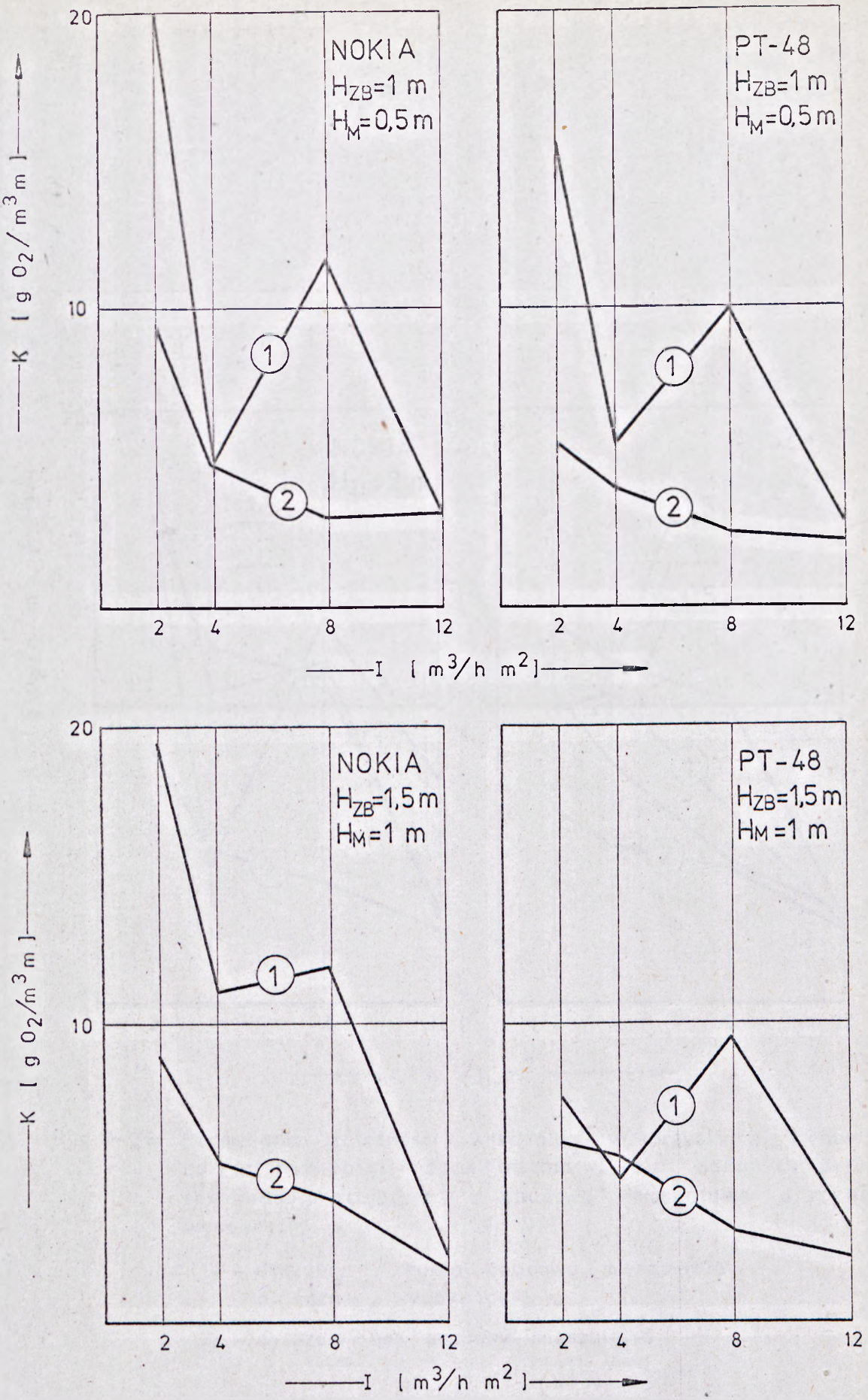
① - dyfuzory z pustą obudową mieszalnika
② - dyfuzory bez obudowy mieszalnika



Rys. 7-24 Porównanie zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika o różnej wysokości:

① - dyfuzory z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości

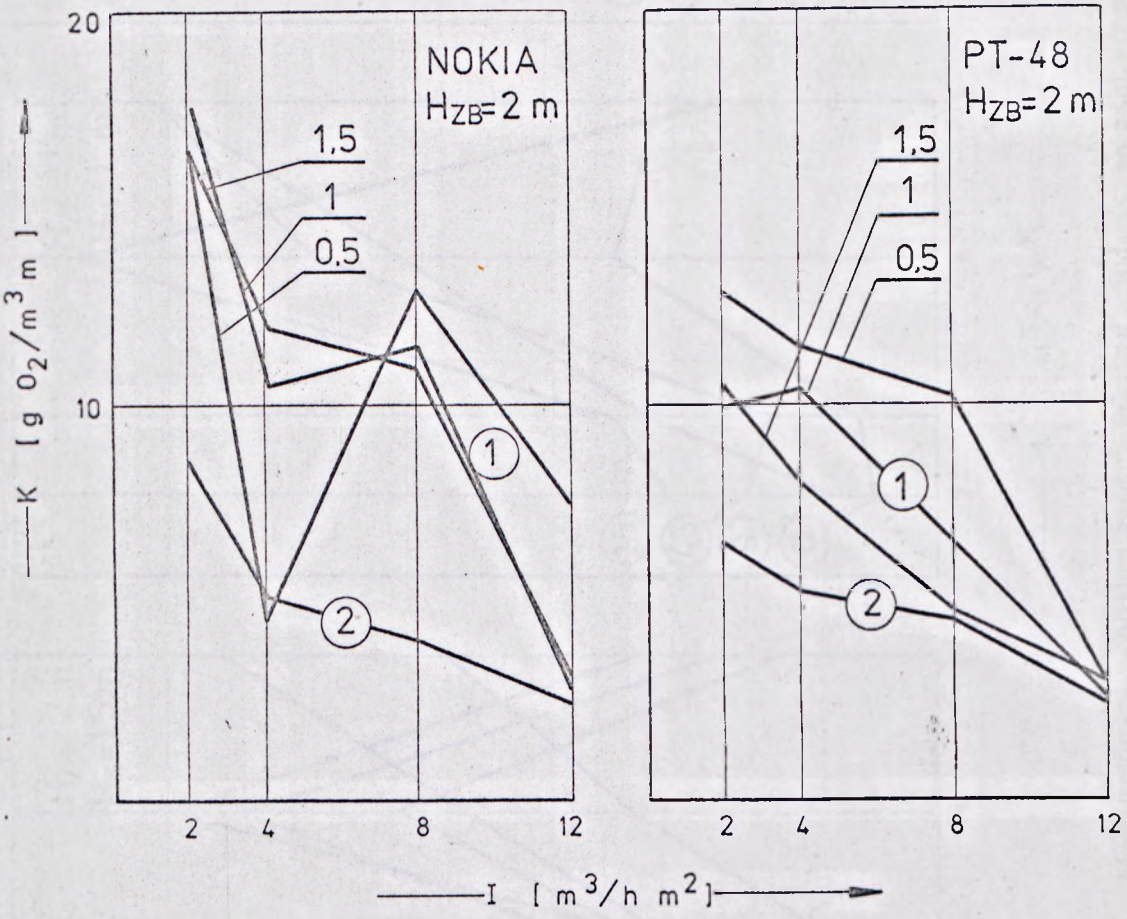
② - dyfuzory bez obudowy mieszalnika



Rys. 25 Porównanie zależności wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika :

① – dyfuzory z pustą obudową mieszalnika

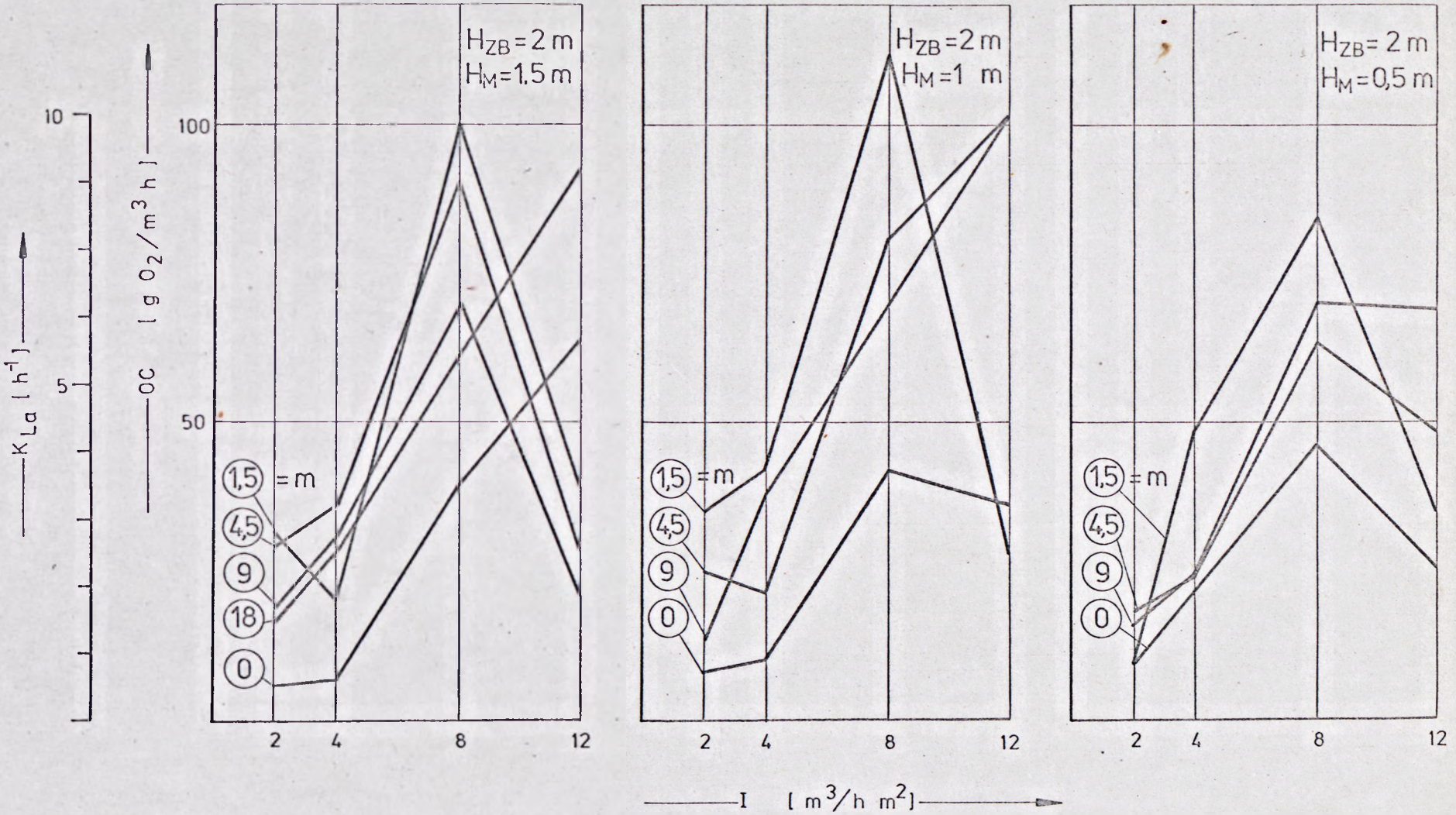
② – dyfuzory bez obudowy mieszalnika



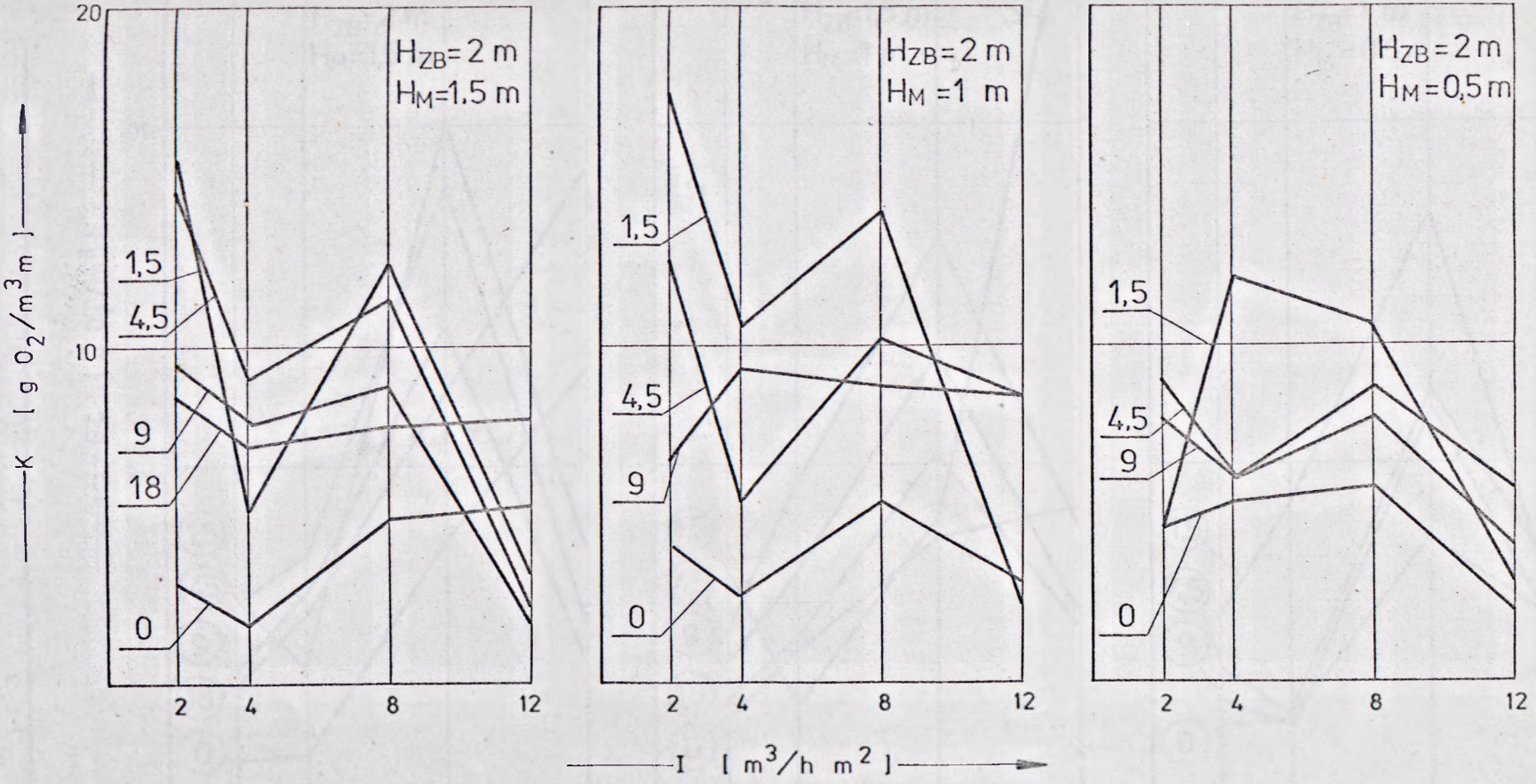
Rys. 7-26 Porównanie zależności wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I dla badanych dyfuzorów współpracujących z obudową mieszalnika o różnej wysokosci:

① – dyfuzory z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości

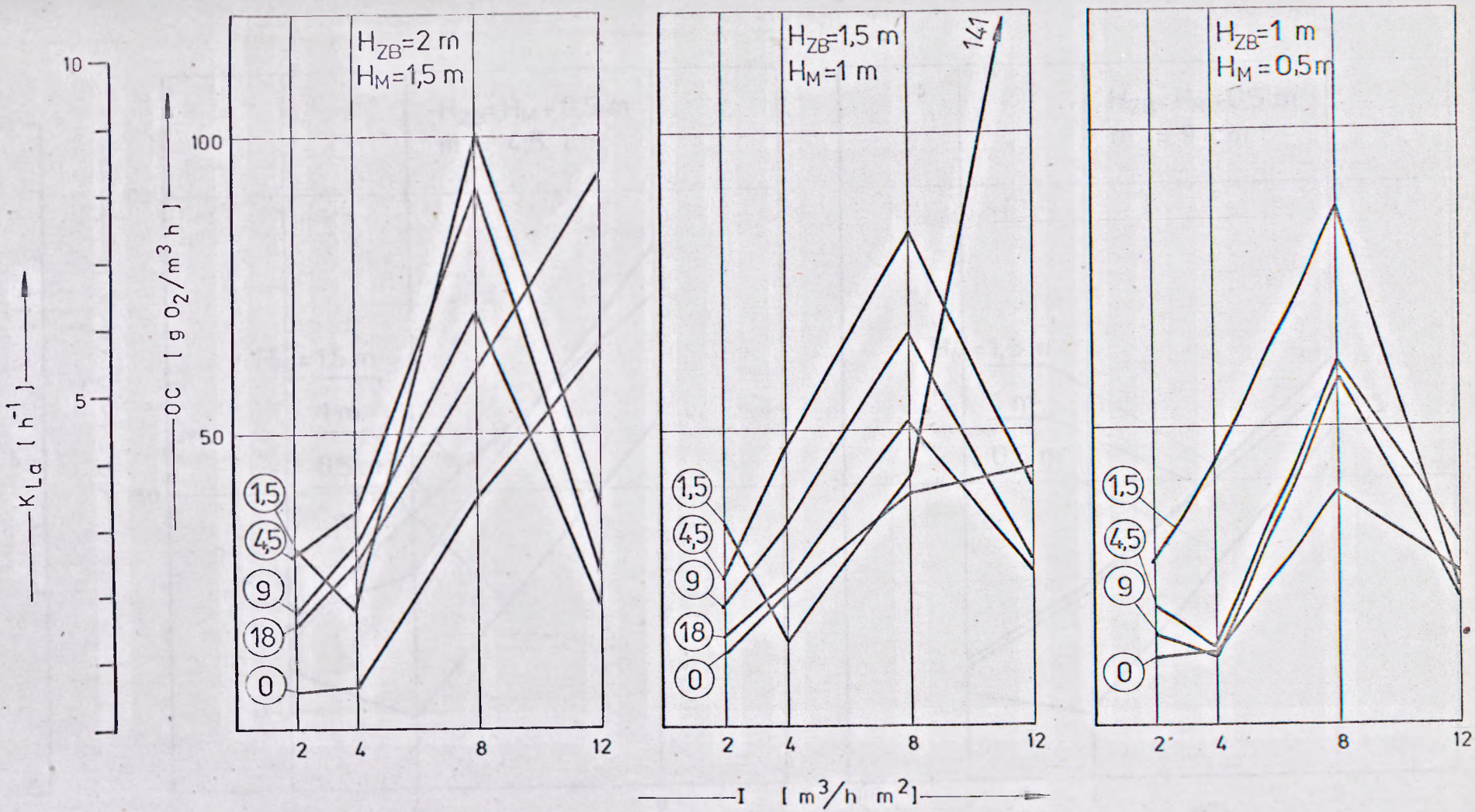
② – dyfuzory bez obudowy mieszalnika



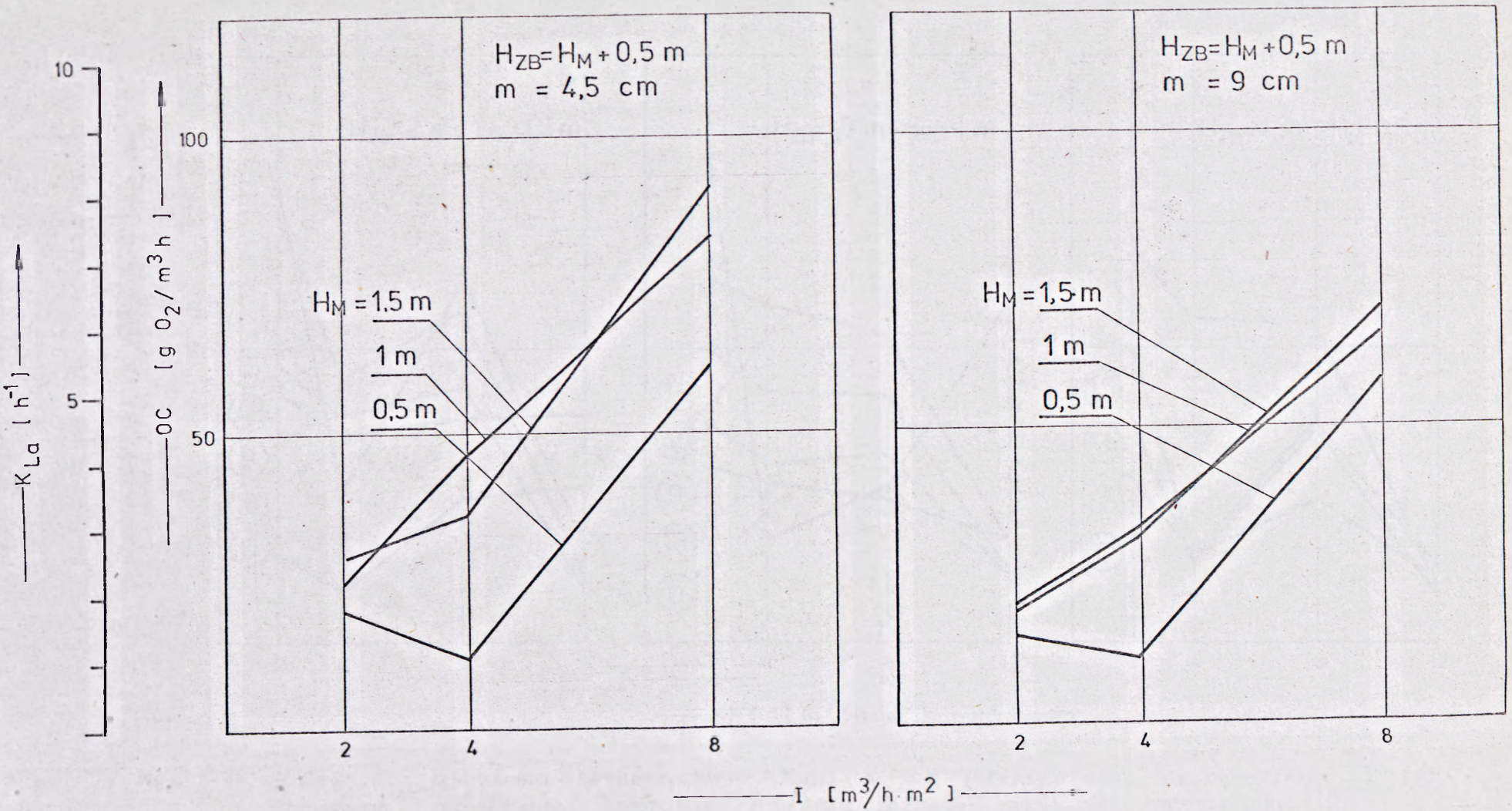
Rys. 7-27 Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2 m dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawie siatek m



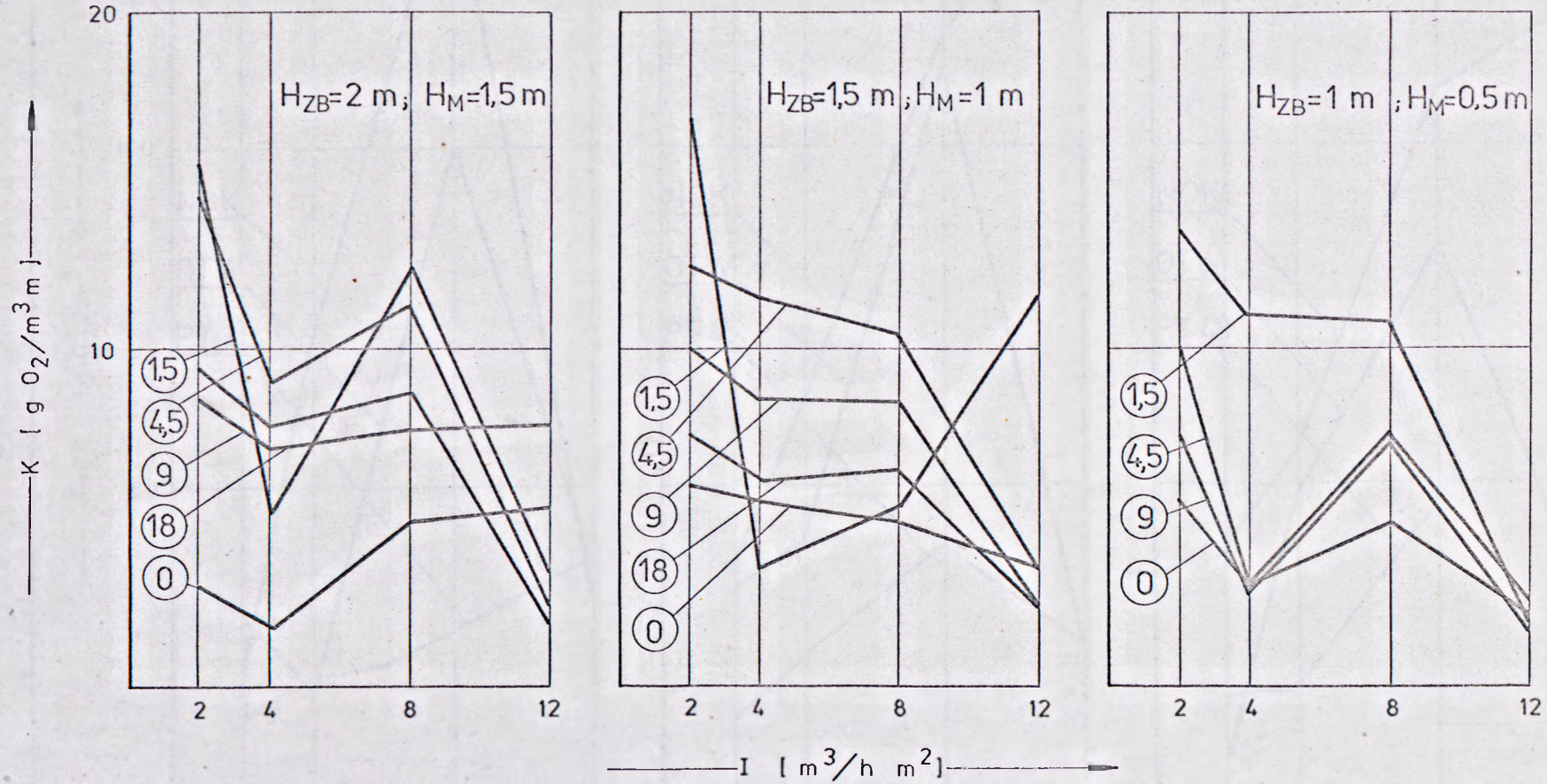
Rys. 7-28 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m.



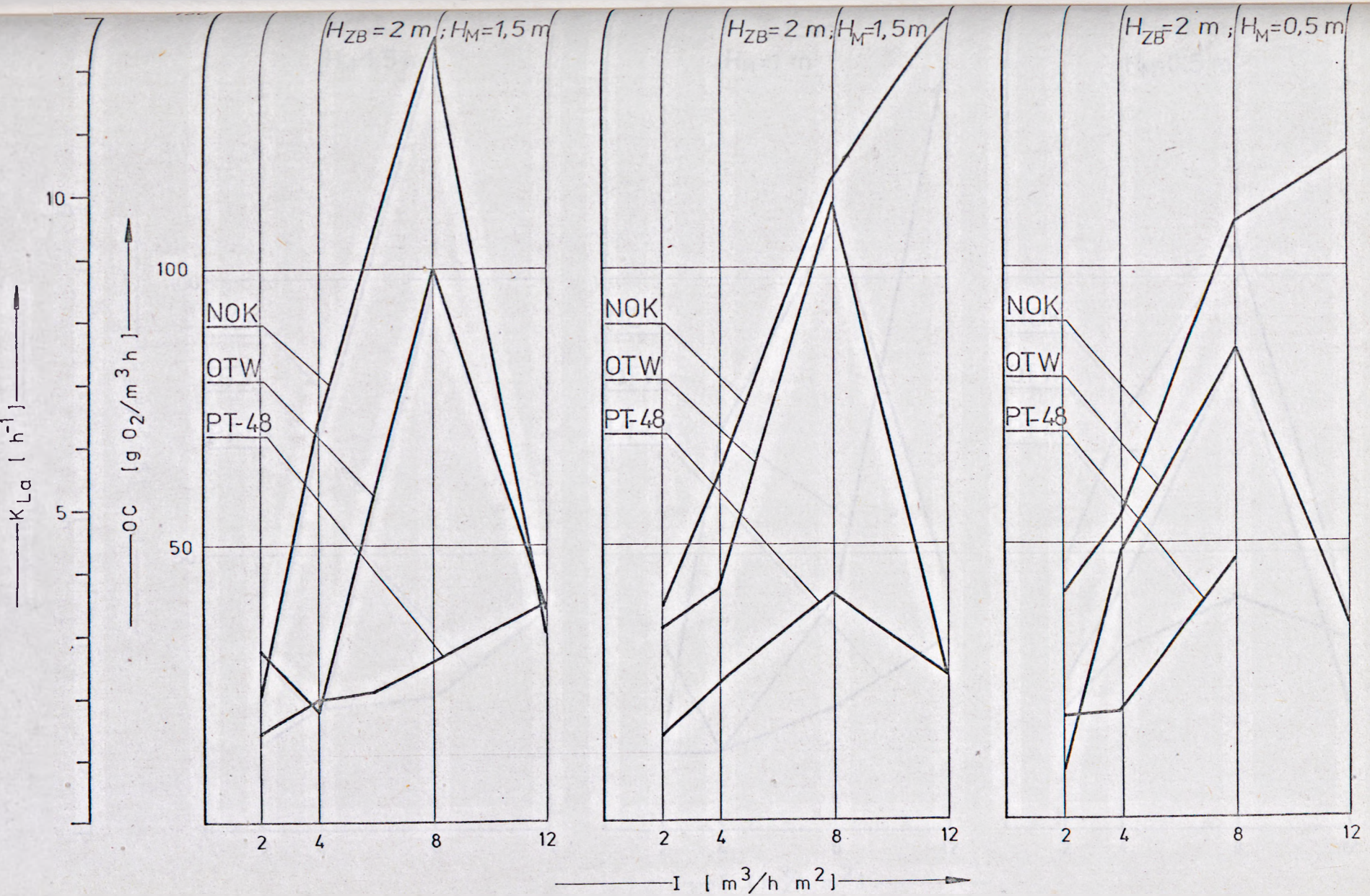
Rys. 7-29. Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB} dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m.



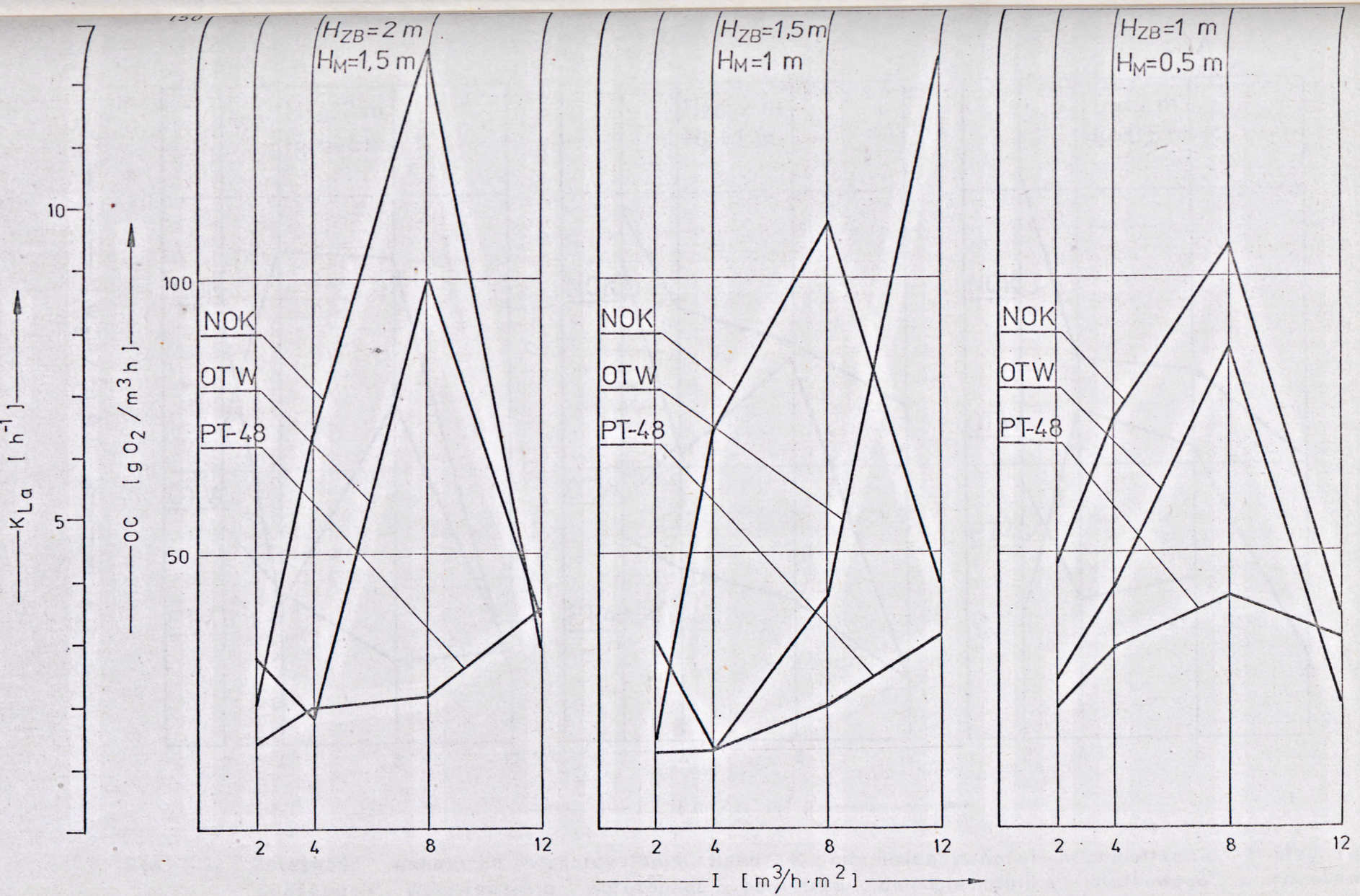
Rys. 7-30. Wybrane zależności efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I dla układów z mieszalnikiem siatkowym.



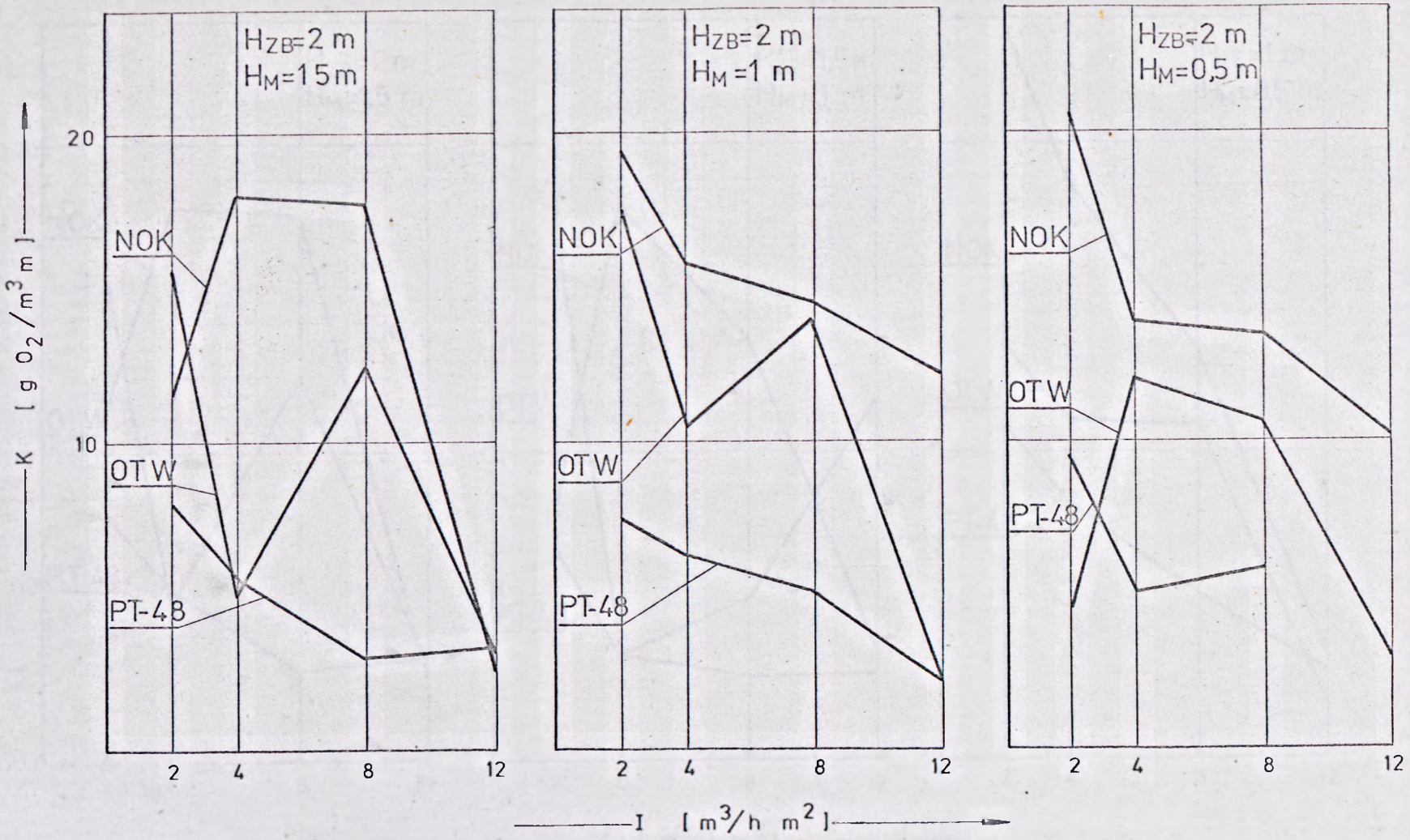
Rys. 7-31. Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy zmiennym napełnieniu zbiornika H_{ZB} dla różnych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m.



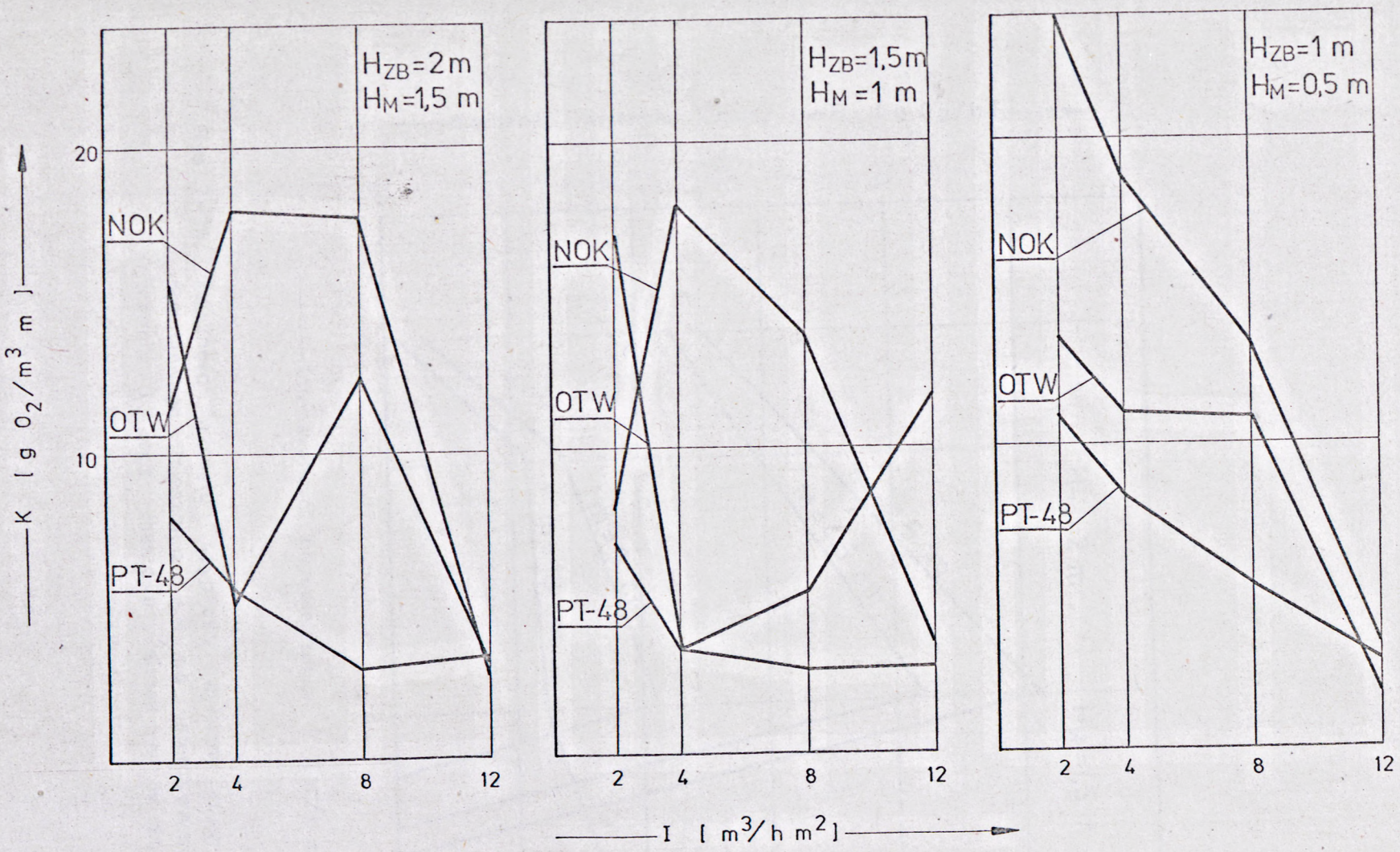
Rys. 7-32. Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB} = 2 m i różnych wysokości mieszalnika H_M



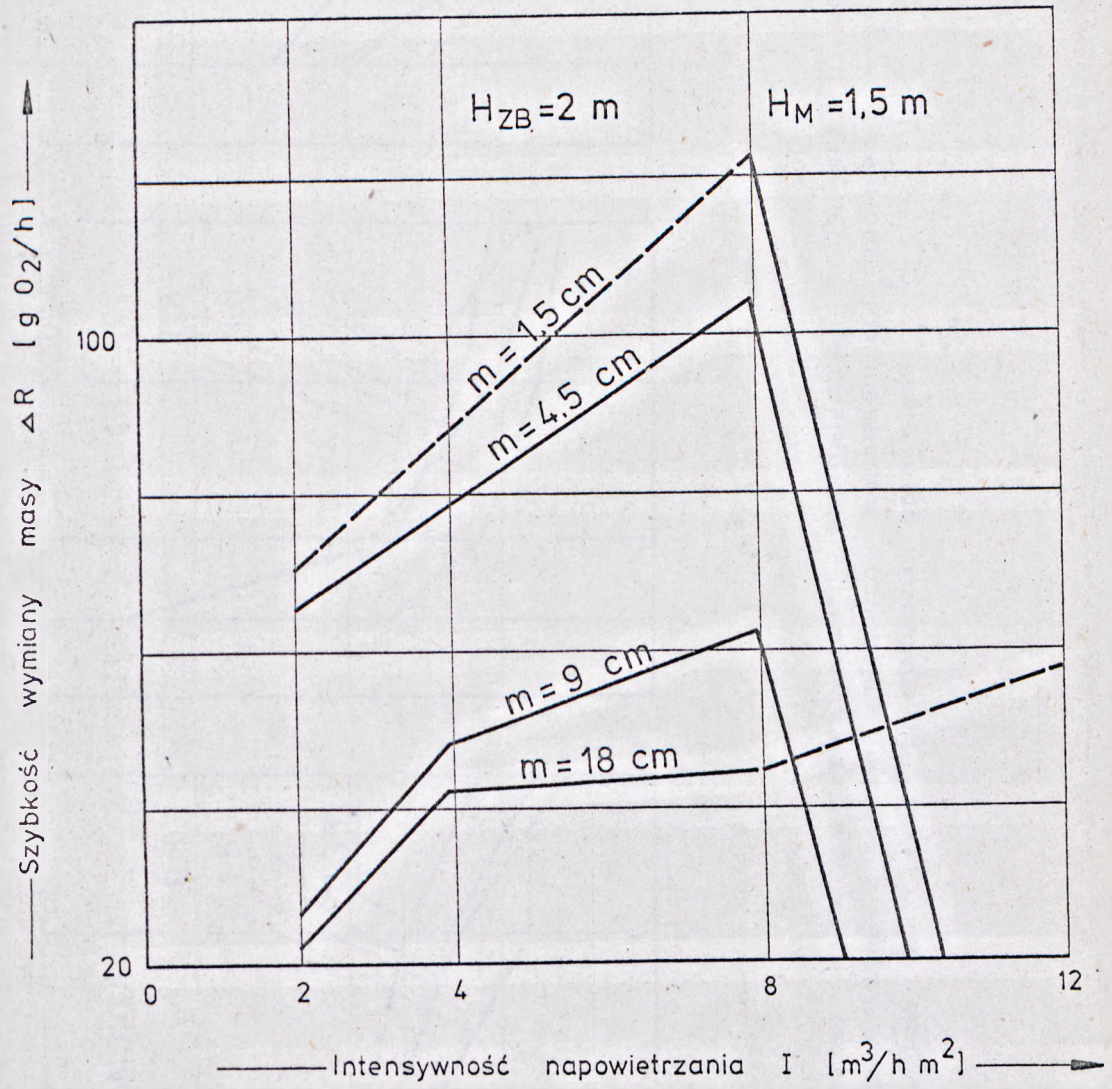
Rys. 7-33. Zależność efektywności natleniania OC od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych: napełnienia zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M



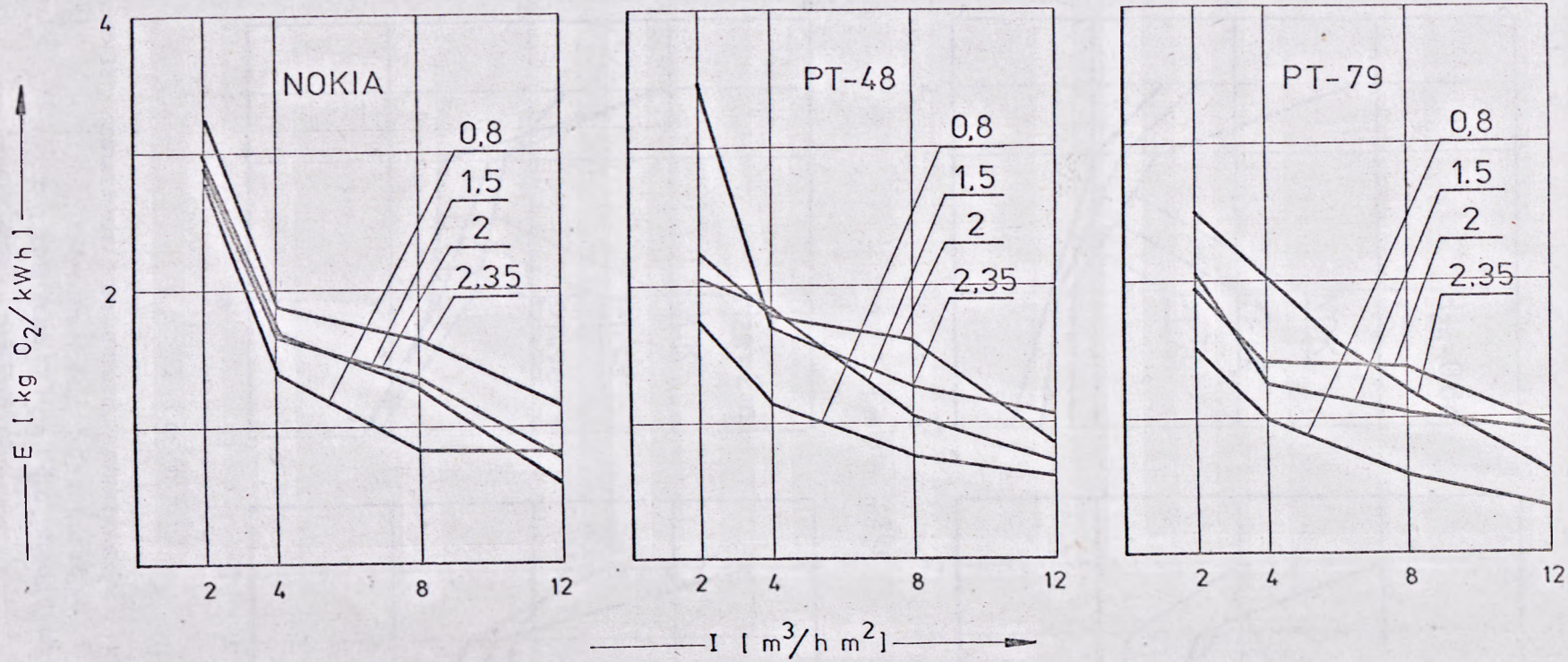
Rys. 7-34. Zależność wskaznika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB}= 2 m i różnych wysokości mieszalnika H_M.



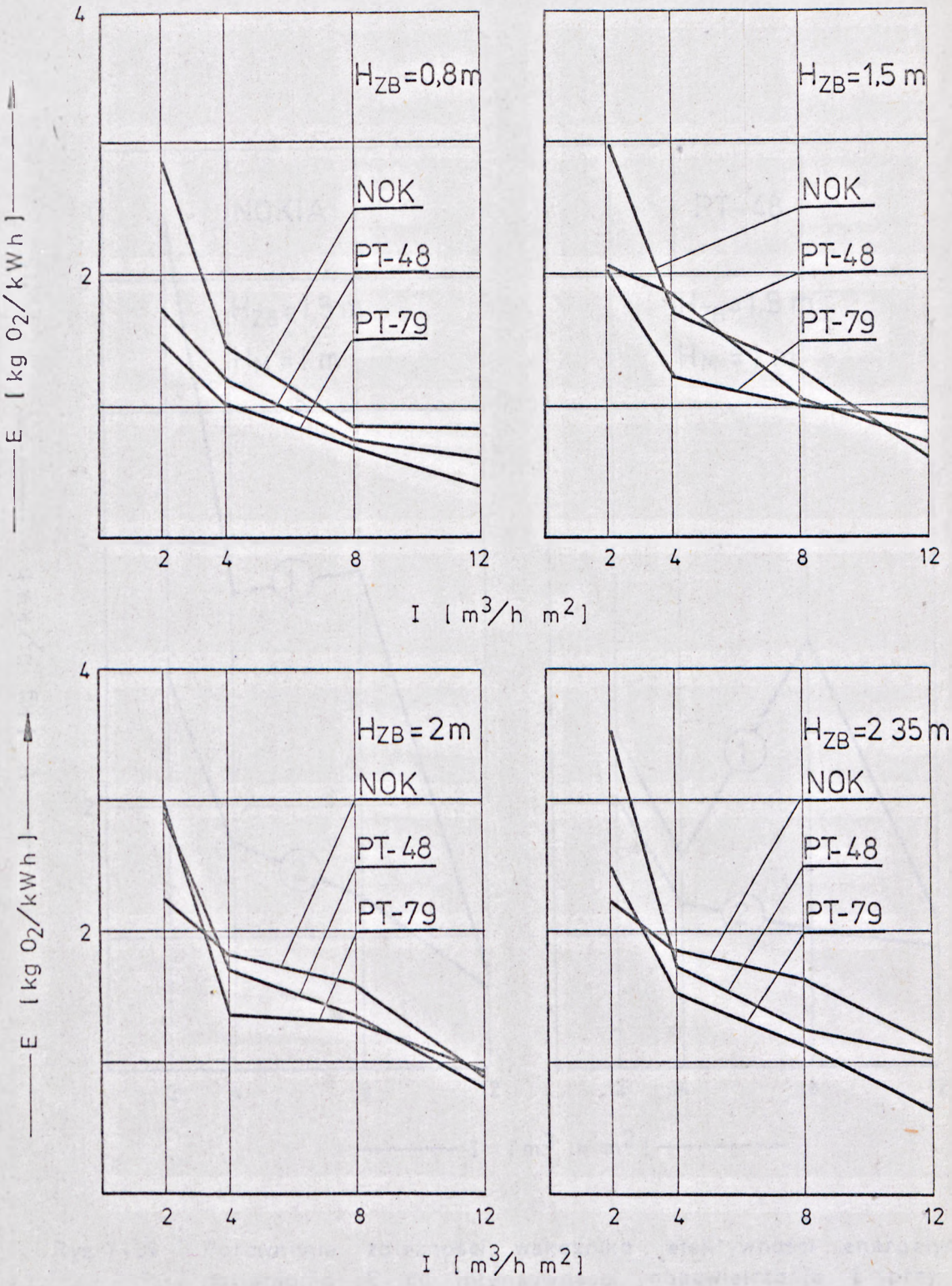
Rys. 7-35 Zależność wskaźnika wykorzystania tlenu K od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla zmiennych : napełnienia zbiornika H_{ZB} i wysokości mieszalnika H_M.



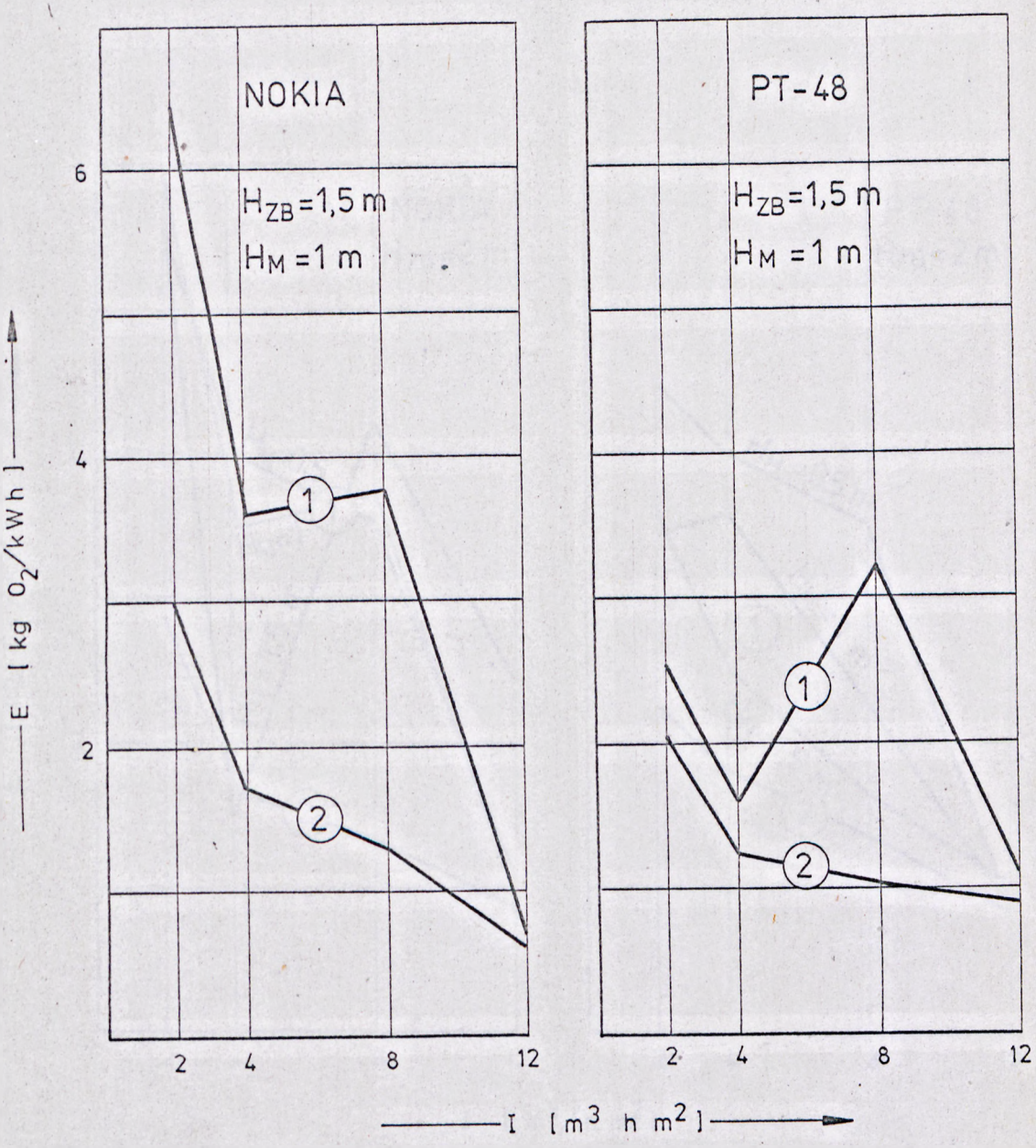
Rys. 7-36 Zależność wzrostu szybkości wymiany masy na skutek dodatkowego mieszania ΔR od intensywności napowietrzania I oraz rozstawu siatek m w mieszalniku.



Rys. 7-37 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.



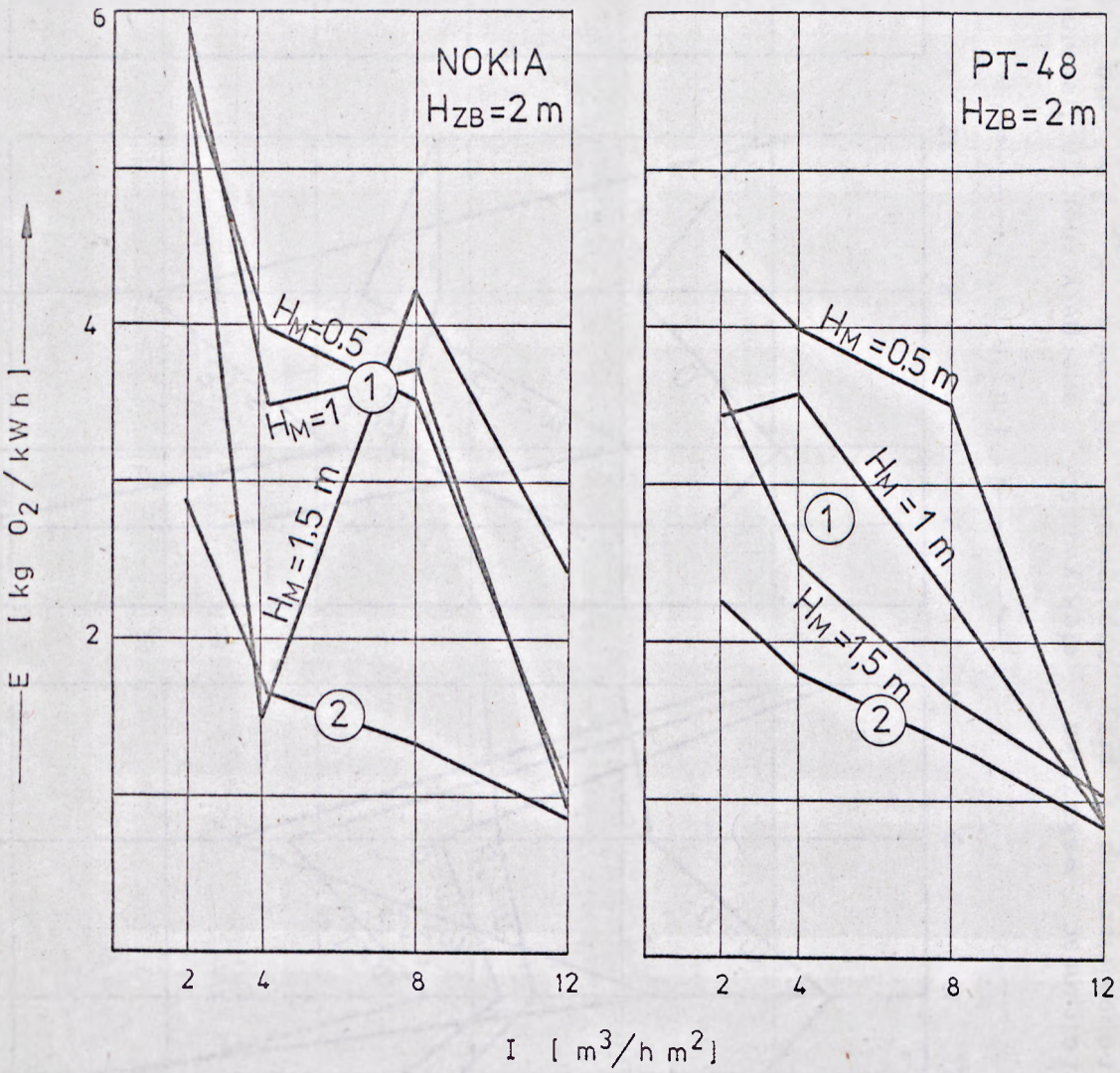
Rys. 7-38 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy stałych napełnieniach zbiornika H_{ZB} dla badanych dyfuzorów z różnymi przegrodami porowatymi.



Rys 7-39 Porównanie zależności wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=1,5 m dla dyfuzorów :

① - z pustą obudową mieszalnika

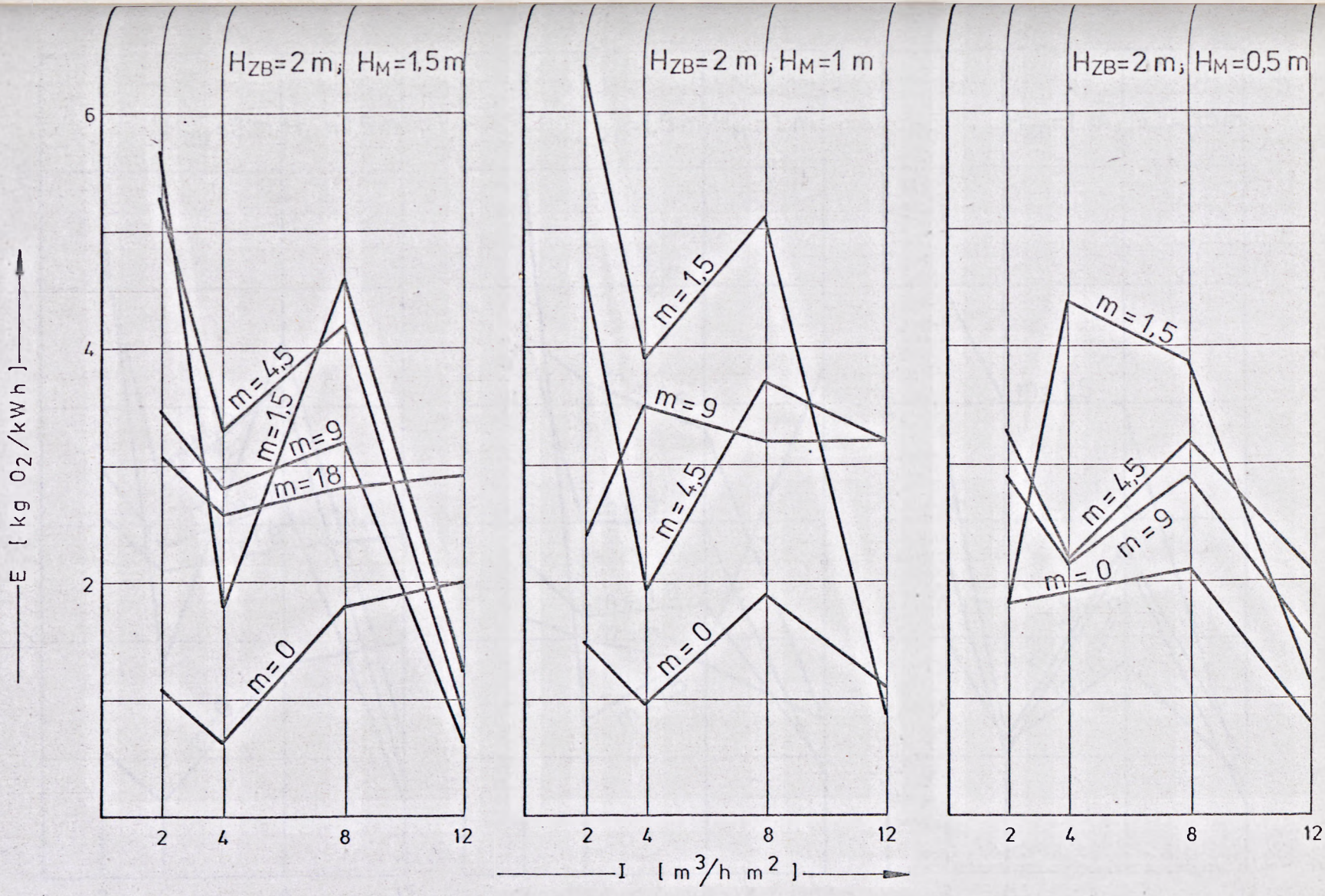
② - bez obudowy mieszalnika



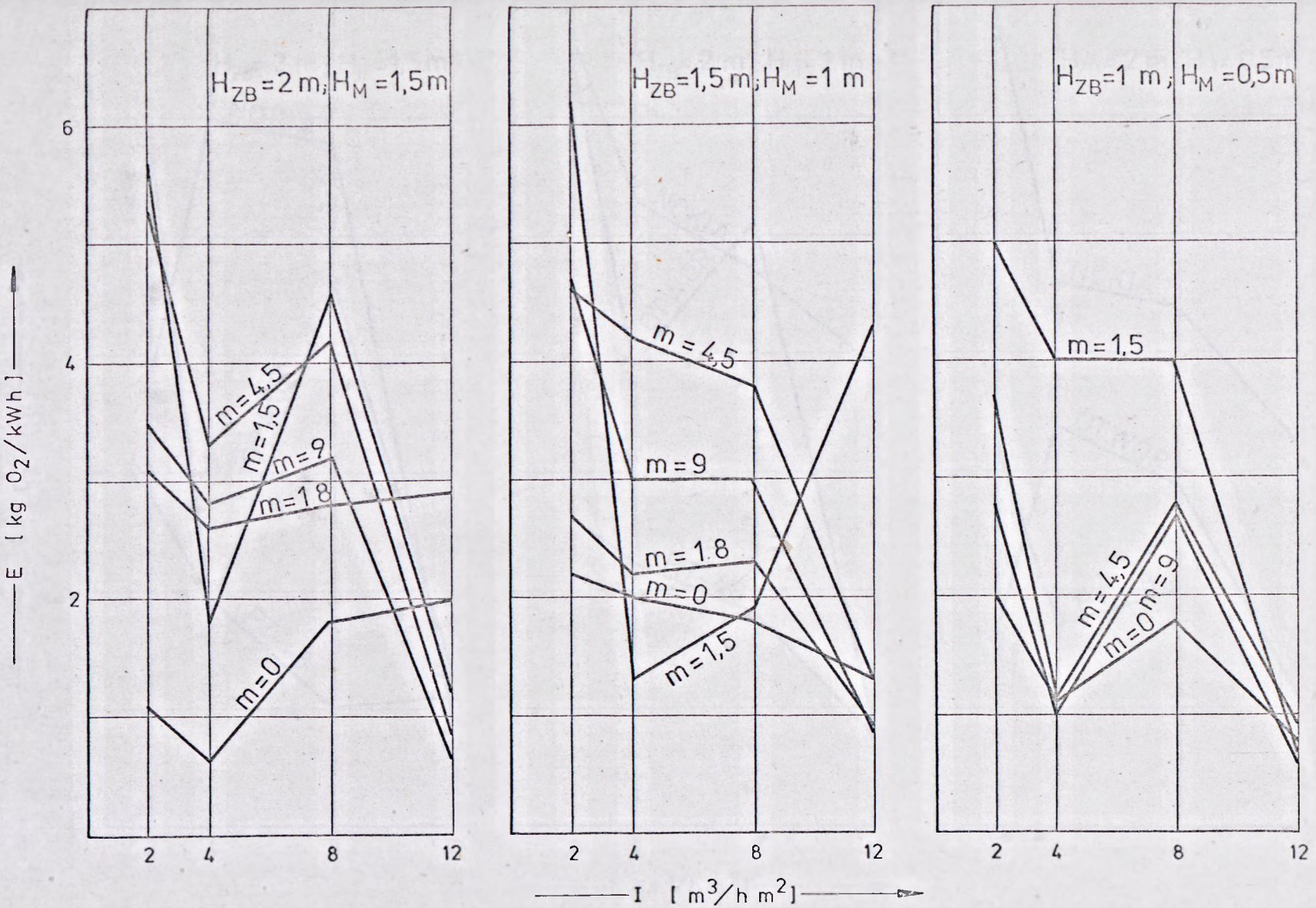
Rys. 7-40 Porównanie zależności wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2 m dla dyfuzorów :

① - z pustą obudową mieszalnika o różnej wysokości

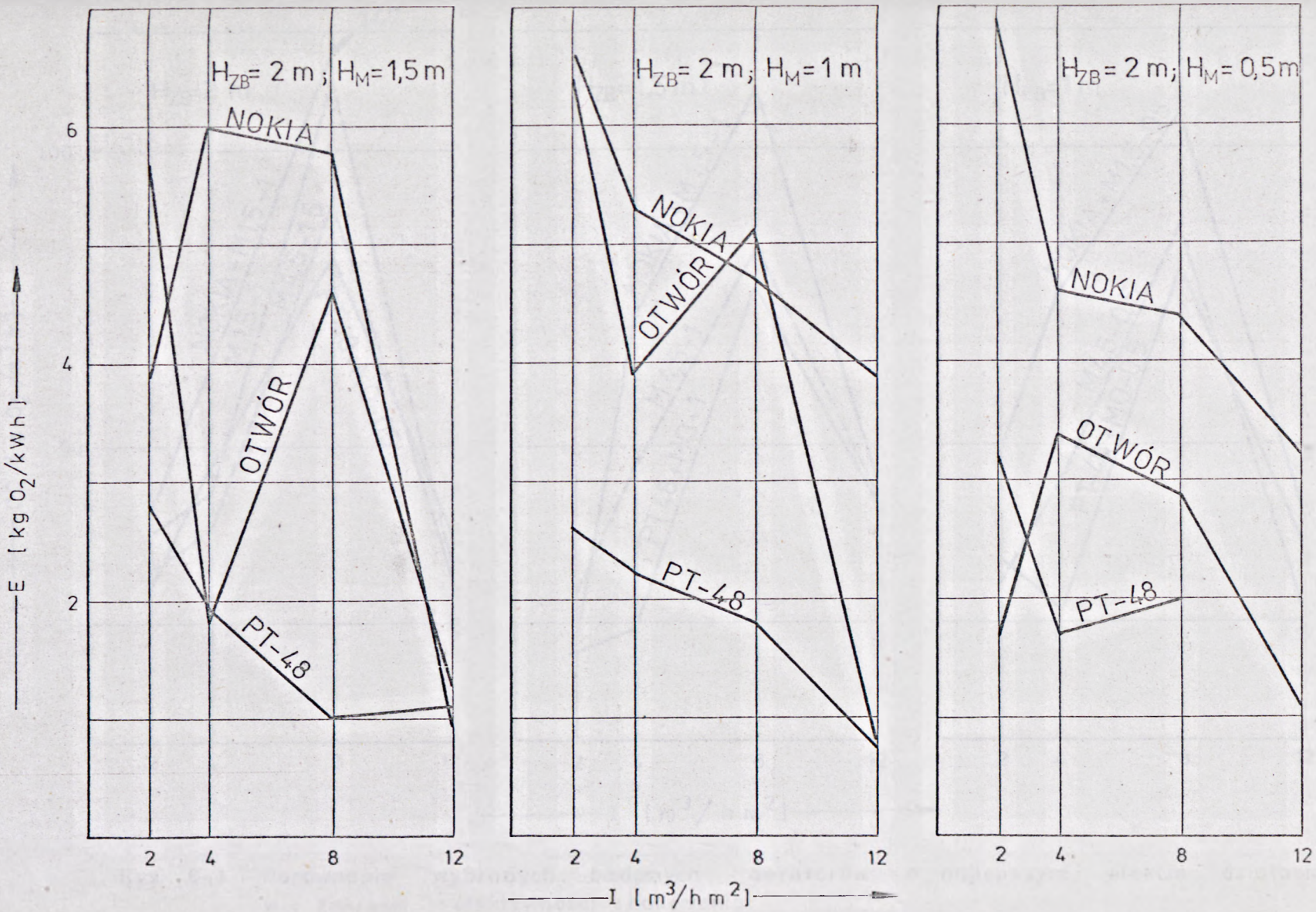
② - bez obudowy mieszalnika



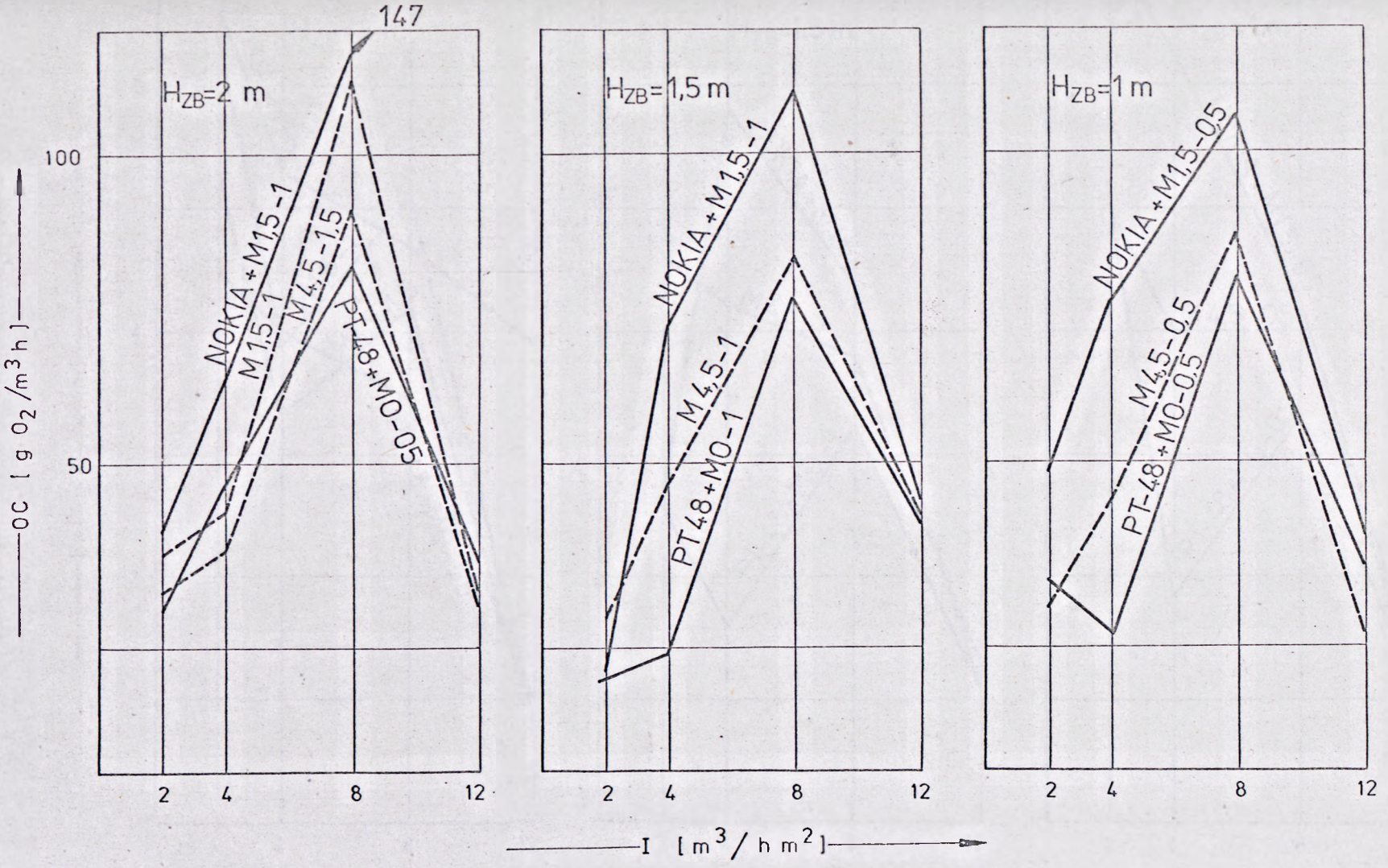
Rys. 7-41. Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}=2 m dla zmiennych wysokości mieszalnika H_M i rozstawu siatek m.



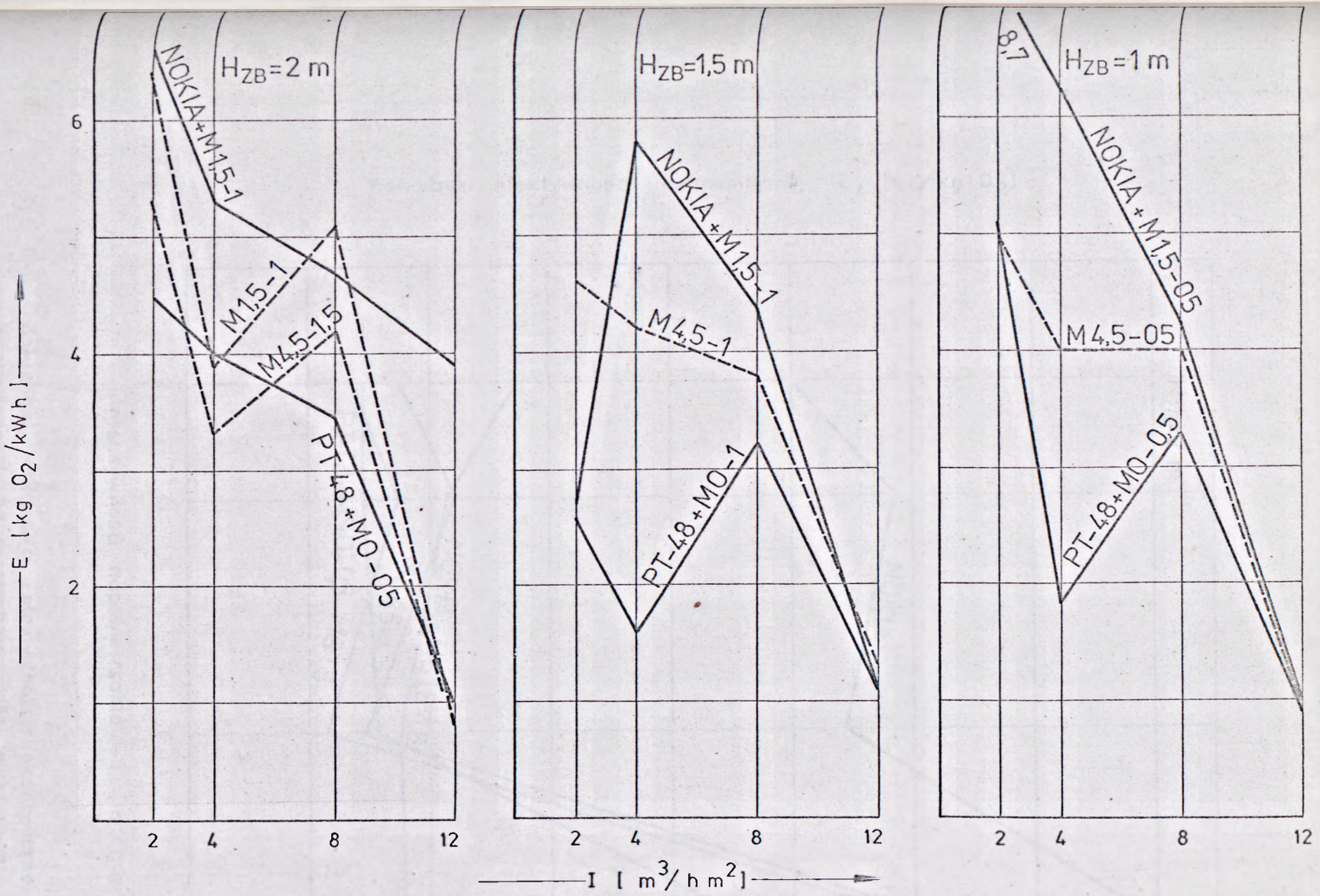
Rys 7-42 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej E od intensywności napowietrzania I przy zmiennych napełnieniach zbiornika H_{ZB}, wysokościach mieszalnika H_M i rozstawach siatek m.



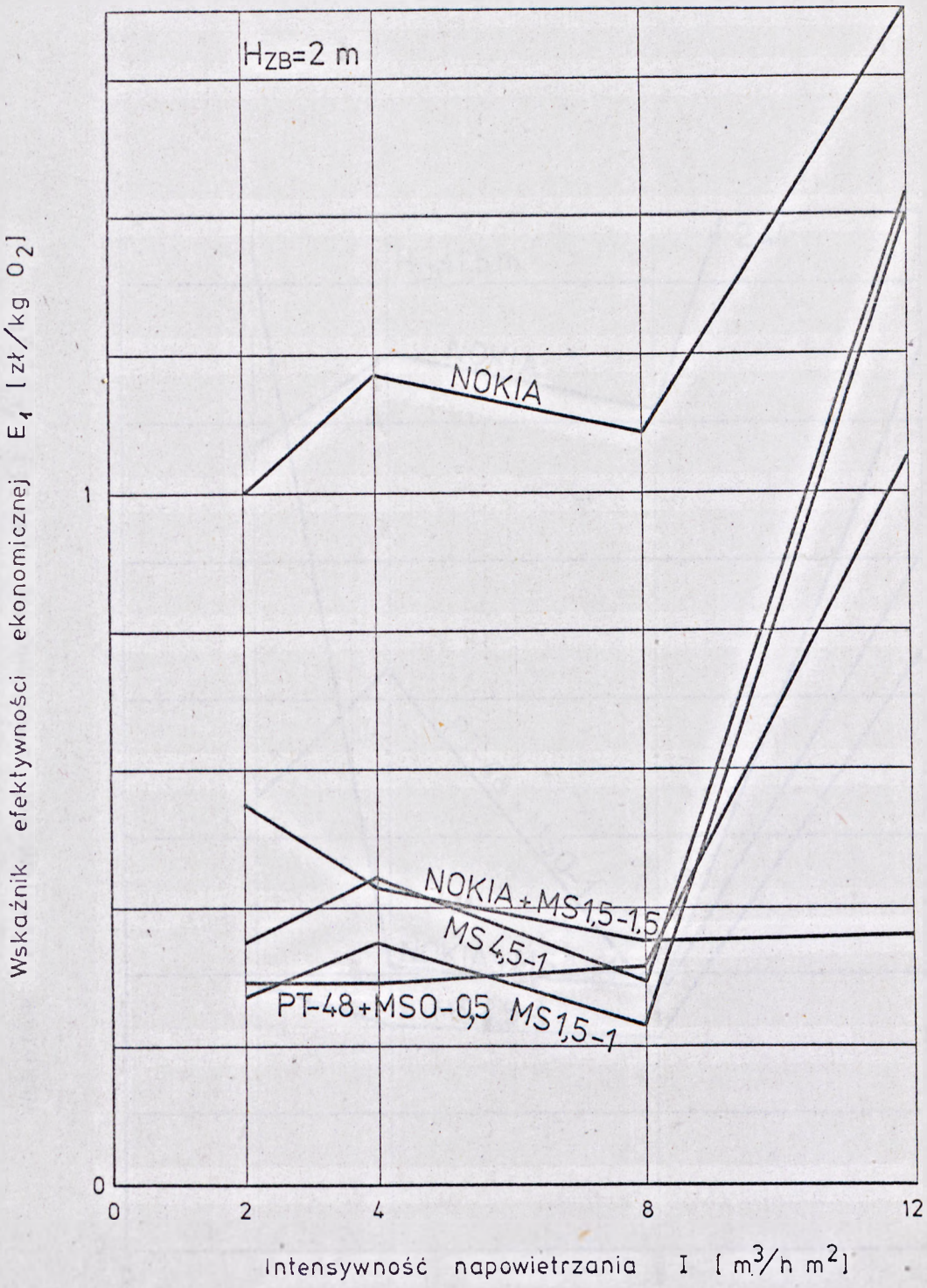
Rys. 7-43 Zależność wskaźnika efektywności energetycznej natleniania E od intensywności napowietrzania I przy różnych sposobach wprowadzenia sprężonego powietrza do mieszalnika siatkowego o rozstawie siatek m = 1,5 cm dla napełnienia zbiornika H_{ZB}=2 m i wysokości mieszalnika H_M.



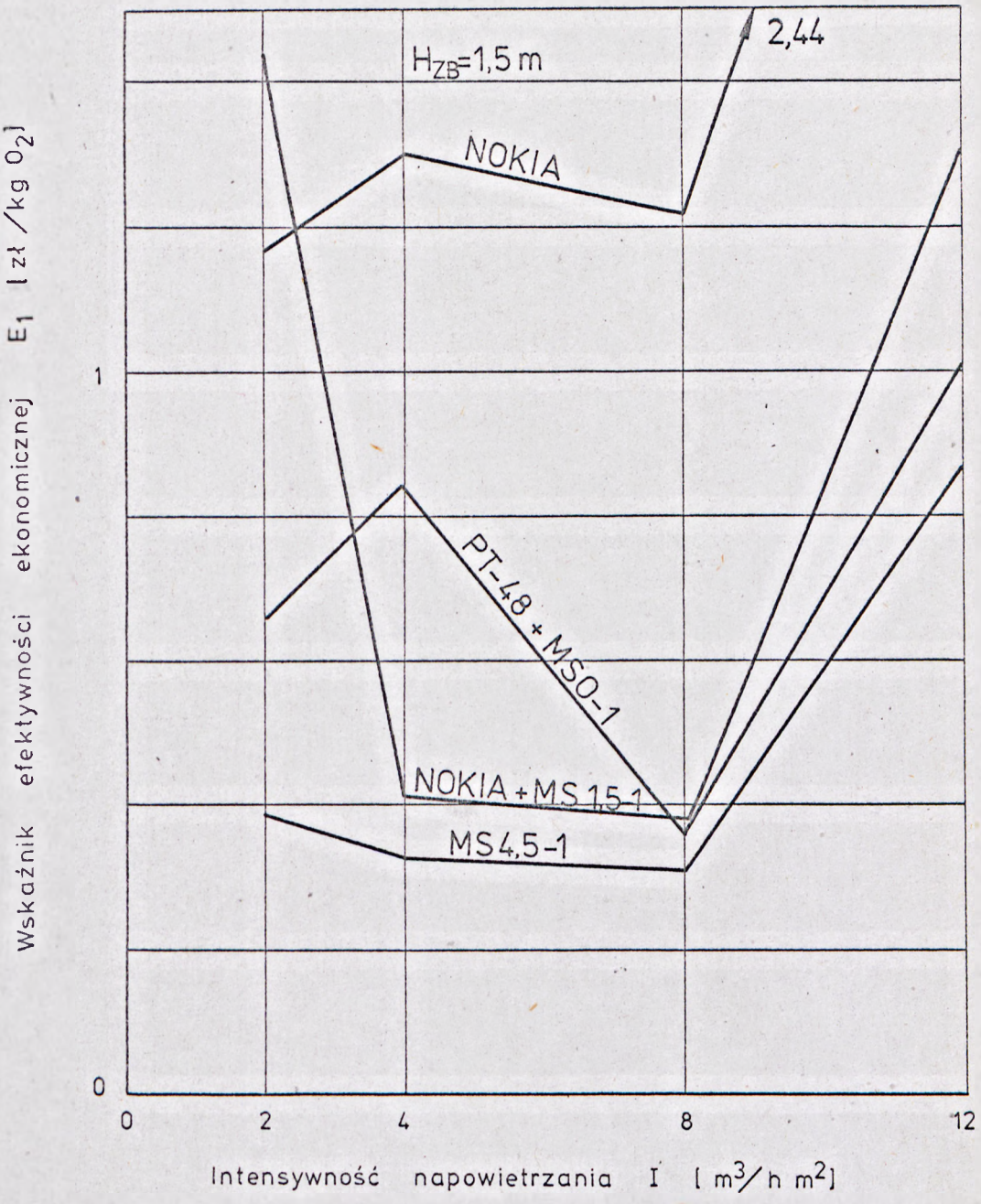
Rys. 8-1 Porównanie wybranych badanych aeratorów o najlepszym efekcie działania w zakresie efektywności natleniania.



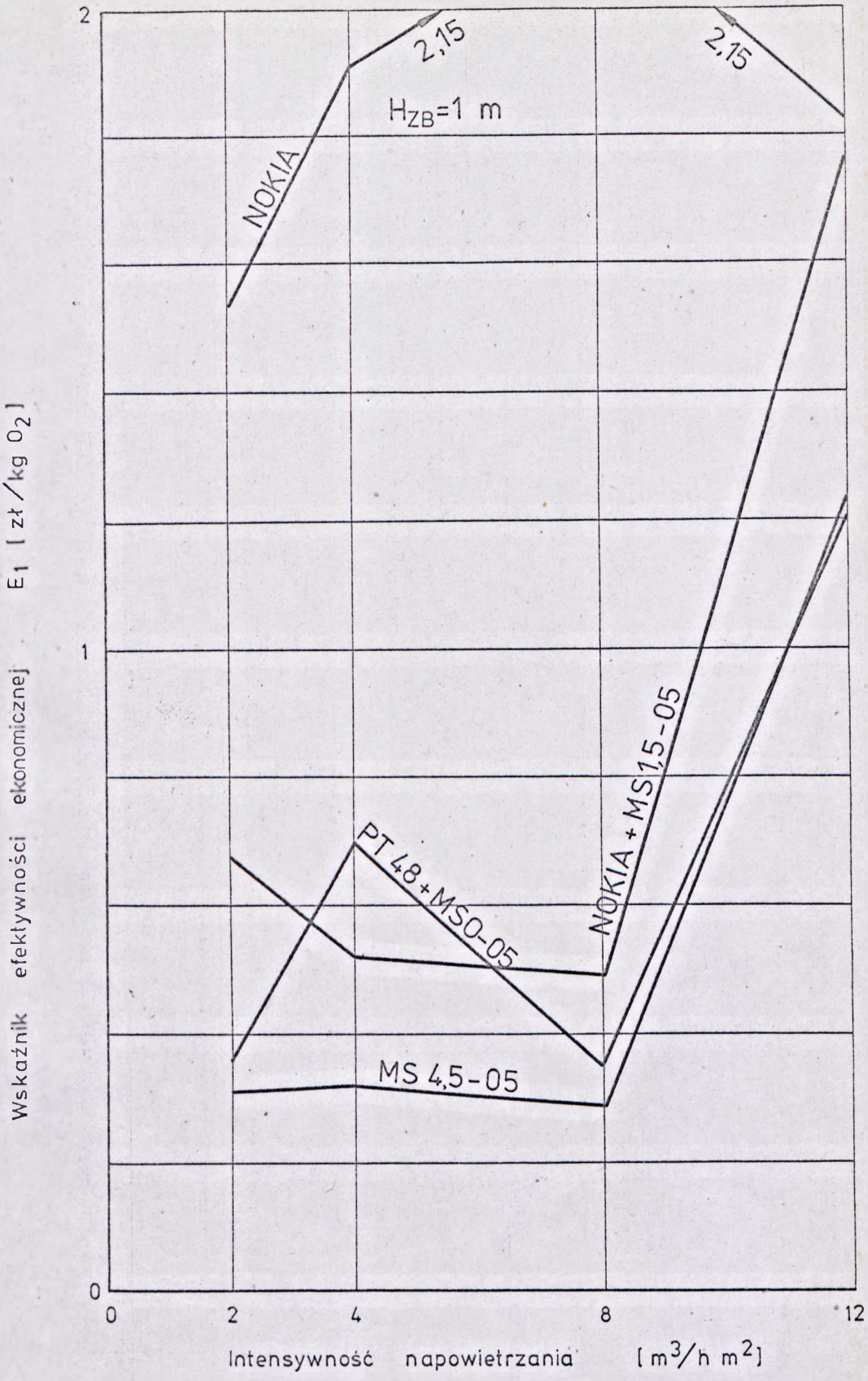
Rys 8-2 Porównanie wybranych badanych aeratorów o najlepszym efekcie działania w zakresie efektywności energetycznej operacji natleniania.



Rys. 8-3 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 2 m



Rys. 8-4 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB}= 1,5 m



Rys. 8-5 Zależność wskaźnika efektywności ekonomicznej od intensywności napowietrzania dla wybranych układów przy napełnieniu zbiornika H_{ZB} = 1 m.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Biblioteka Główna

R
2 804