

Voordracht voor Vereniging Ned. Industrie Apothekers (N.I.A.)- 17 april 1975

LUCHTTOEVOERSYSTEMEN VOOR STOF- EN KIEMARME RUIMTEN<sup>x)</sup>IG-TNO  
INSTITUUT VOOR MILIEUHYGIENE  
EN GEZONDHEIDSTECHNIEK TNO

publikatie nr. 536

DELFT - SCHOEMAKERSTRAAT 97 - POSTBUS 214

P.A. Bossers

1. INLEIDING

Het is niet de bedoeling om in deze voordracht voorschriften te geven of installaties te beschrijven waarmee U naar het bedrijf kunt gaan en een stofarme omgeving voor een bepaald proces kunt realiseren. Dit zou in het algemeen op een teleurstelling uitlopen, omdat noch een stel voorschriften noch een perfect uitgevoerde installatie het kunnen stellen zonder begrip van hetgeen zich afspeelt in een ruimte met betrekking tot de verspreiding van stof. Daarom is de voordracht ook daarop gericht, het geven van begrip omtrent de verschijnselen. In de tweede voordracht, die van de heer Heidt, zal nader op gebruik van bepaalde methoden worden ingegaan.

2. STOFBRONNEN EN STOFCONSTRUCTIES

In eerste instantie kan ten aanzien van de plaats van stofbronnen een eerste scheiding worden gemaakt en wel stof afkomstig van bronnen in een ruimte en stof afkomstig van buiten de beschouwde ruimte.

2.1. Interne stofbronnen

Meestal is de "productie" van interne stofbronnen de grootste oorzaak van schadelijke of hinderlijke stofconcentraties. De meest voorkomende bronnen zijn:

- a. de mens,
- b. het proces.

ad a. De huid van de mens wordt voortdurend vernieuwd en afgestorven huiddeeltjes, in de vorm van kleine schilfers laten van het lichaam los. Het aantal deeltjes dat losraakt per tijds-eenheid hangt sterk af van de mate van beweging.

Het valt te begrijpen dat bij veelvuldig bewegen de huid steeds gespannen en ontspannen wordt waardoor de schilfers

<sup>x)</sup> Publ.no. 536 van het Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek TNO, Schoemakerstraat 97, Delft.



sneller worden gevormd en loslaten. Kleding kan zowel een positieve als een negatieve uitwerking hebben op de hoeveelheid huidschilfers die in de lucht terecht komt. Enerzijds namelijk kan de kleding door afscherming beletten dat de losgelaten deeltjes in de ruimte terecht komen, anderzijds kan de productie van huidschilfers verhoogd worden door de schurende werking van de kleding. Ook als de kleding voldoende dicht is om huidschilfers tegen te houden, kunnen door "pompwerking" van de kleding en "schoorsteenwerking" van de luchtlaag tussen huid en kleding verontreinigingen via de openingen bij de ledematen en de nek in de ruimte komen.

Het vet van de huid kan schilfers vasthouden; wassen waardoor dit vet verwijderd wordt kan dus aanleiding geven tot grotere hoeveelheden huidschilfers in de lucht.

Afhankelijk van de factoren beweging en kleding kunnen honderduizenden tot miljoenen deeltjes groter dan  $0,3 \mu\text{m}$  door één persoon per minuut in de lucht worden gebracht [1].

- ad b. Ook het productieproces dat in een ruimte plaatsvindt veroorzaakt vaak een grote hoeveelheid stof. Denkt U maar eens aan het mengen van poedervormige stoffen, tabletteren, verpakken (papiervezels) e.d. Soms vinden in één ruimte verschillende werkzaamheden plaats, waarbij stof van het ene proces hinderlijk of schadelijk is voor het andere. Dat is het moment waarop men zich gaat bezinnen op maatregelen. De meest voor de hand liggende is dan uiteraard de werkzaamheden over verschillende ruimten te verdelen, waarbij het begrip ruimte hier kan worden opgevat als bouwkundige en als zeer plaatselijke, dus door een machine "in te pakken".

## 2.2. Externe stofbronnen

Als er geen stofvrije lucht (of lucht met een lagere stofconcentratie dan in de ruimte) aan een ruimte zou worden toegevoerd en er geen sedimentatie (uitzakken van stofdeeltjes) zou plaatsvinden, dan zou de stofconcentratie blijven oplopen als er in de ruimte een stofbron aanwezig is. Om de stofconcentratie beneden een zekere



grens te houden zal er dus geventileerd moeten worden. In sommige gevallen ligt deze grens zo laag dat buitenlucht er zonder meer niet aan voldoet. Daarom wordt de van buiten betrokken lucht dan eerst gefilterd tot de gewenste reinheid, anders zou de buitenlucht zelf als stofbron kunnen worden opgevat.

De mate van filtering hangt af van de eisen die men aan de toegevoerde lucht stelt en aan het stofgehalte van de buitenlucht. Elk filter laat namelijk een gedeelte van het aangeboden stof door, zelfs de zgn. absoluutfilters die bijvoorbeeld een rendement hebben van 99,997% voor deeltjes groter dan  $0,3 \mu\text{m}$  laten toch nog door. Bij de keuze van een filter is het dan ook vaak beter om de eis die aan de luchtkwaliteit wordt gesteld te relateren aan de penetratie van het filter. De penetratie is dan gedefinieerd als (100 - rendement) %. (fig. 1). Een moeilijkheid bij de keuze van filters is dat de rendementen (en penetratie) vaak zijn bepaald met verschillende testmethoden en daardoor niet vergelijkbaar zijn [2].

De keuze van de hoeveelheid ventilatielucht om onder een zekere stofconcentratie in een ruimte te blijven bij een bekende stofproductie wordt later behandeld.

### 3. VERPLAATSING VAN STOF

Als er ergens in een ruimte stof ontstaat bij een productieproces, dan zal het stof niet blijven op de plaats waar het is gevormd. Grotere stofdeeltjes zullen door de werking van de zwaartekracht vrij snel vallen en op de grond blijven liggen; de kleinere deeltjes zullen min of meer blijven zweven. Dit vermogen om gedurende enige tijd in de lucht te blijven en door de lucht te worden meegevoerd hangt af van de valsnelheid. De valsnelheid op zijn beurt hangt weer af van de vorm van het deeltje en de soortelijke massa van het materiaal waaruit het bestaat. De deeltjes met kleine valsnelheid bezorgen de meeste last want zij zullen door luchtbewegingen worden meegevoerd en luchtbeweging is er vrijwel altijd. Hoe ontstaat nu die luchtbeweging.



### 3.1. Het ontstaan van luchtbewegingen

Op zich zelf zal lucht niet gaan bewegen, er is een drijvende kracht voor nodig. De drijvende kracht kan worden ontleend aan twee oorzaken namelijk

- a. mechanische inwerking
- b. temperatuurverschillen.

ad a. Bij de mechanische werking op de lucht gaat het om een bewegend voorwerp dat de luchtmassa verdringt in zijn bewegingsrichting en de lucht gepaard gaande met wervels achter zich doet aansluiten. Voor deze vorm van in beweging zetten is in het algemeen de mens verantwoordelijk. Hij beweegt zelf, doet deuren open en dicht (hiermee verplaatst hij zo'n  $2 \text{ m}^3$  lucht!), blaast lucht in en uit en zet machines in beweging.

ad b. Demeeste luchtbewegingen ontstaan door temperatuurverschillen en deze bewegingen zijn ook het moeilijkst onder controle te krijgen. Door temperatuurverschillen wordt warmte van voorwerpen overgedragen aan de lucht die daardoor een andere soortgelijke massa krijgt dan de omringende lucht en daardoor verplaatst wordt. Ook bij dit verschijnsel spelen personen een rol omdat zij praktisch altijd een temperatuur hebben die hoger is dan de luchttemperatuur. Langs personen stroomt (vooral bij overigens rustige lucht) een dunne laag lucht omhoog en laat bij het hoofd los als een kolom warme lucht waarin de snelheid tussen 0,2 en 0,3 m/s ligt (fig. 2) [3].

Bij apparaten of machines gebeurt hetzelfde, als de vlakken die in aanraking zijn met de lucht in temperatuur met die lucht verschillen. Niet te vergeten als bron voor luchtbeweging zijn die apparaten die er voor bestemd zijn om de lucht te verwarmen zoals radiatoren en convectoren. Zij verwarmen niet alleen, zij brengen ook de lucht in beweging, om een egaal klimaat te bewerkstelligen. De zon die een wand, een stuk vloer, een venster of binnenzonwering bestraalt kan een aanzienlijke luchtbeweging veroorzaken. Ook echter als het buiten koud is kan het venster door afkoeling van de lucht, die daardoor omlaag zal stromen (koude val langs ramen) forse



hoeveelheden lucht verplaatsen.

Een bron van luchtbeweging en luchtuitwisseling van verschillende ruimten waartussen (kleine) temperatuurverschillen heersen, wordt maar al te vaak vergeten. Als er tussen twee ruimten een temperatuurverschil is zal namelijk warme lucht uit de ene ruimte via de bovenzijde van de deuropening naar de koudere ruimte stromen en via de onderzijde van de deuropening zal een stroming in tegengestelde zin optreden (fig. 3). Om een indruk te geven van welke orde van grootte deze uitwisseling is: een temperatuurverschil van  $1^{\circ}\text{C}$  veroorzaakt een uitwisseling van  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ ! (in beide ruimten wordt geen mechanische ventilatie verondersteld) [4]

Een laatste oorzaak van luchtbeweging en luchtuitwisseling tussen ruimten is de wind. Dit valt wel enigszins buiten de hiervoor besproken oorzaken maar mag toch niet vergeten worden. Een gebouw is nooit geheel luchtdicht, vooral bij te openen ramen zijn altijd luchtlekken aan te wijzen. Bovendien moeten er altijd deuren zijn om het gebouw en de ruimten te kunnen betreden. De wind, die op een gebouw staat geeft aan de loefzijde een overdruk en aan de lijzijde, de zijwanden en het dak een onderdruk. Binnen het gebouw zal, afhankelijk van de grootte en lengte van de kieren, een luchtstroming optreden onder invloed van het drukverschil (fig. 4). Het onaangename van deze wijze van luchtverplaatsing is dat zij afhankelijk is van de windrichting. Alleen door zorgvuldige maatregelen zowel bouwkundig als met een ventilatiesysteem kan een gewenste stromingsrichting gehandhaafd blijven.

#### 4. LUCHTBEWEGING TEN GEVOLGE VAN VENTILATIE

Het toevoeren van schone lucht aan een ruimte met het doel het niveau van verontreinigingen beneden een zekere waarde te houden, is op zich oorzaak van luchtbeweging die het transport van deeltjes van de ene plaats naar de andere verzorgt. Voor deze luchtbeweging is vooral de toevoer van de lucht verantwoordelijk. De luchttoevoer geschiedt meestal via roosters in een wand of in het plafond. Na het rooster vormt zich



een luchtstraal die een zekere hoeveelheid bewegingsenergie bevat. Op zijn weg in de ruimte sleurt de straal omringende luchtdeeltjes mee (induceert) en verdeelt daarmee zijn energie (snelheid) over een grotere hoeveelheid lucht. Dit mengproces ten aanzien van de energie geldt ook voor temperatuurverschillen tussen de straal en de rest van de ruimte en voor verschillen in luchtkwaliteit (fig. 5). Als voorbeeld hoe zo een straal de gehele luchtbeweging beïnvloedt nemen we een straal met een luchtvolume  $V$  die op zijn weg een dubbele hoeveelheid lucht induceert (fig. 6). Via de afvoeropening verdwijnt een zelfde hoeveelheid  $V$  als is toegevoerd, zodat een volume  $2V$  in de ruimte, meestal als één of meer grote wervels, in beweging blijft.

De invloed van een afvoeropening op het stromingsbeeld is van veel geringere betekenis dan de toevoerstraal; in feite is de invloed vrijwel te verwaarlozen. Stel namelijk dat in een wand een afvoeropening is gemaakt. De lucht wordt dan aangezogen over een oppervlak van een halve bol, met andere woorden een verdubbeling van de afstand geeft een vergroting van het oppervlak van de halve bol met een factor 4, waardoor de luchtsnelheid een kwart is van de op de daarvoor beschouwde afstand (fig.7).

Opmerking Waarschijnlijk ten overvloede moet worden opgemerkt dat voor ventilatie altijd twee openingen aanwezig moeten zijn: één voor toevoer en één voor afvoer van de lucht.

##### 5. BEPERKING VAN DE CONCENTRATIE VAN VERONTREINIGINGEN

Indien in een bepaalde ruimte een proces plaats vindt waarbij verontreinigingen vrij komen, loont het vaak de moeite om eerst na te gaan of deze niet plaatselijk kunnen worden afgevoerd. Daar is dan meestal weinig lucht voor nodig omdat ter plaatse van de bron de concentratie het hoogst is. Zo een maatregel kan variëren van een afzuigkap waarmee opstijgende verontreinigde lucht kan worden opgevangen en afgezogen (of als het om zware dampen of koude lucht gaat een afzuiginrichting onder de machine) tot het volledig in een omkasting plaatsen van het proces en deze omkasting van luchttoe- en -afvoer voorzien.

Zijn de hierboven genoemde maatregelen niet mogelijk dan zal de gehele ruimte moeten worden geventileerd. Uit hetgeen in paragraaf 4 is vermeld over de luchtstraal zal eenvoudig zijn in te zien dat er een sterke



menging optreedt van toegevoerde (schone) lucht en aanwezige lucht in de ruimte. Er zal een gemiddelde concentratie ontstaan, die afhankelijk is van de hoeveelheid verontreinigde stoffen die per tijdseenheid vrij komen en de hoeveelheid ventilatielucht. De laatste wordt meestal uitgedrukt in het ventilatievoud, dat wil zeggen de hoeveelheid die per uur wordt toegevoerd gedeeld door de inhoud van de betreffende ruimte. Let wel dat het om een continu proces gaat en dat een ventilatievoud van bijvoorbeeld 4 niet wil zeggen dat de ruimte 4 x per uur ververscht wordt. Wat is nu de invloed van het ventilatievoud op de concentratie, uitgaande van een continue toevoer van verontreinigingen en volledige menging van toegevoerde en aanwezige lucht. In figuur 8 is aangegeven hoe bij verschillende ventilatievouden uitgaande van concentratie 0 het verloop in de tijd is. Afhankelijk van het ventilatievoud wordt na enige tijd een evenwichtsconcentratie bereikt, die op zichzelf ook afhangt van het ventilatievoud. Na het stoppen van de toevoer van verontreinigingen daalt de concentratie des te scherper naarmate het ventilatievoud hoger is. De eindconcentratie is zoals al in figuur 8 te zien was omgekeerd evenredig met het ventilatievoud. Dit is nog eens uitgezet in figuur 9. Hieruit is te zien dat bij een gegeven productie van verontreinigingen en volledige menging, ventileren boven een ventilatievoud van 10 à 15 wel veel kost aan energie en investering, maar dat het effect op de eindconcentratie nauwelijks merkbaar is. Om tot veel lagere concentraties te komen moet dus menging zoveel mogelijk worden vermeden. Dit betekent dat een luchtdeeltje op één plaats maar één maal mag voorkomen met andere woorden een éénrichtingsverkeer voor de lucht. Dergelijke luchttoevoersystemen zijn inderdaad uitgevoerd en heten dan "laminair flow", "Kolbenströmung" e.d. In feite zijn deze systemen niets anders dan een verwijding in een kanaal waarbij filters zorgen voor de kwaliteit van de lucht en een goede verdeling van de lucht over de gehele doorsnede. Deze wijze van ventileren kan zowel van boven naar beneden (down-flow) als van wand tot wand (cross-flow) worden uitgevoerd (fig. 10 en fig. 11). Om te voorkomen dat warmtebronnen de stroming door convectie verstoren, moet een minimale luchtsnelheid worden toegepast van ca. 0,3 m/s bij down-flow tot ca. 0,5 m/s bij cross-flow. Het hoeft geen betoog dat om een zo effectief mogelijk gebruik van de ruimte te maken ook andere maatregelen moeten worden genomen om de stofvorming zo veel mogelijk



tegen te gaan, zoals: speciale kleding, de routing van de producten en vooral de algemene discipline in het werk. Doordat de luchtverplaatsing zeer groot is (voorbeeld: cross-flow-ruimte met een wand van  $6 \times 2,8 \text{ m}^2$ , snelheid van de lucht  $0,45 \text{ m/s}$ , luchthoeveelheid  $27000 \text{ m}^3/\text{h!}$ ) zijn deze systemen zeer duur.

Soms kan een zogenaamde "schone werkbank" voor bepaalde werkzaamheden die onder zeer schone condities moeten worden verricht uitkomst bieden (fig. 12). Zo een werkbank kan in een ruimte worden geplaatst en heeft zijn eigen ventilator en filters. Voorzichtigheid bij opstelling van meerdere werkbanken is geboden om te zorgen dat zij elkaar niet hinderen door de snelheid van de uittredende lucht.

Een verdere beschrijving van deze systemen, het gebruik ervan en de resultaten die ermee kunnen worden bereikt zal de heer Heidt U in zijn voordracht vertellen.

## 6. LITERATUUR

- 1 Austin, Philip R.; Timmerman, Stewart W.  
Design and operation of clean rooms  
Business News Publishing Company. Detroit, Michigan 1965, p. 77
- 2 Wal, J.E. v.d.  
Luchtfilters voor toepassing in Ziekenhuizen  
Publ. no. 439 IG-TNO, 1972
- 3 Clark, R.P.; Cox, R.N.  
The generation of aerosols from the human body, Airborne transmission and airborne infection  
Proceedings of the IVth International Symposium on Aerobiology, 1973, p. 413-426
- 4 Bouwman, H.B.  
Mogen deuren in een Ziekenhuis open blijven staan?  
Publ. no. 437 IG-TNO, 1972



DIBUTYLPHTALAAT - AEROSOL  
GLASVEZELFILTERPAPIER

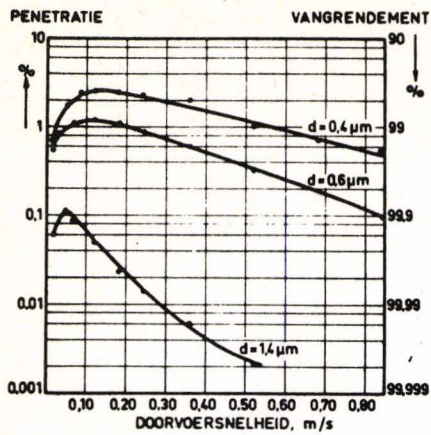


FIG. 1



FIG. 2

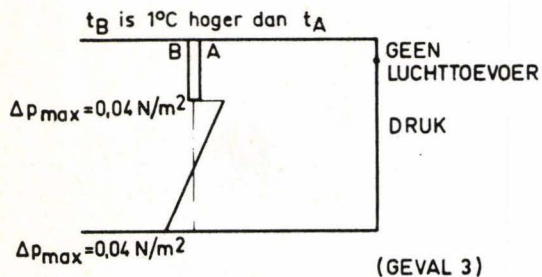
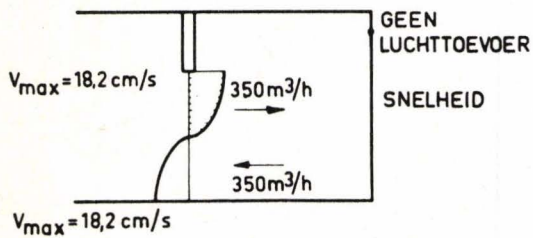


FIG. 3



DRUKVERDELING OM EEN GEBOUW,  
TENGEVOLGE VAN DE WIND

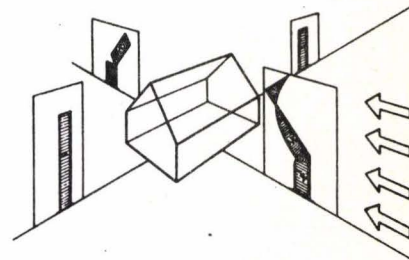
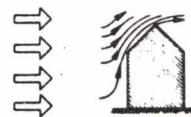


FIG. 4

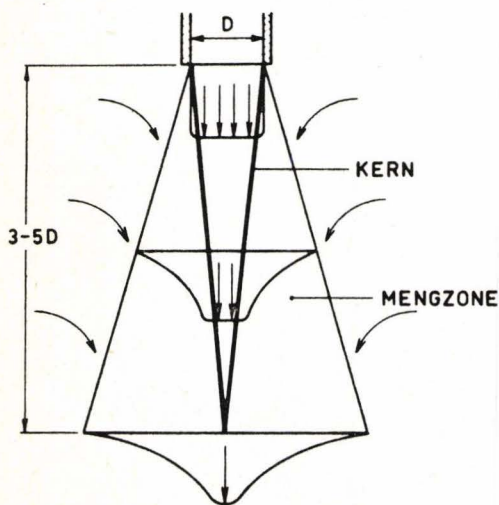
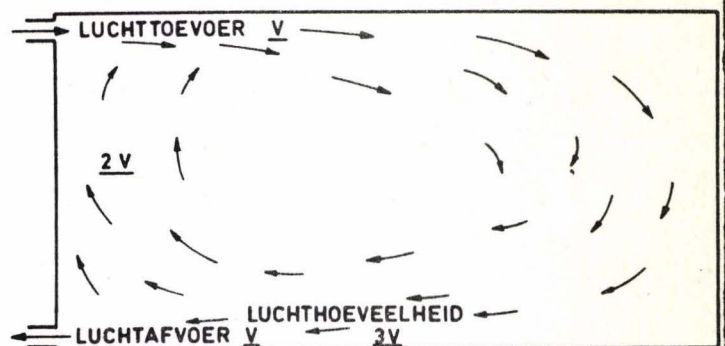


FIG. 5



SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN DE IN BEWEGING  
ZIJNDE LUCHT IN EEN GEVENTILEERDE RUIMTE

FIG. 6



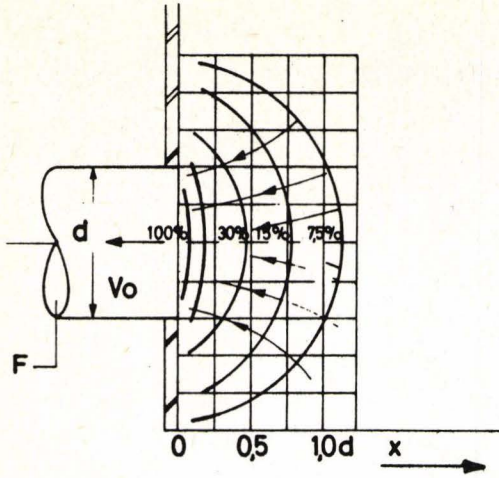


FIG. 7

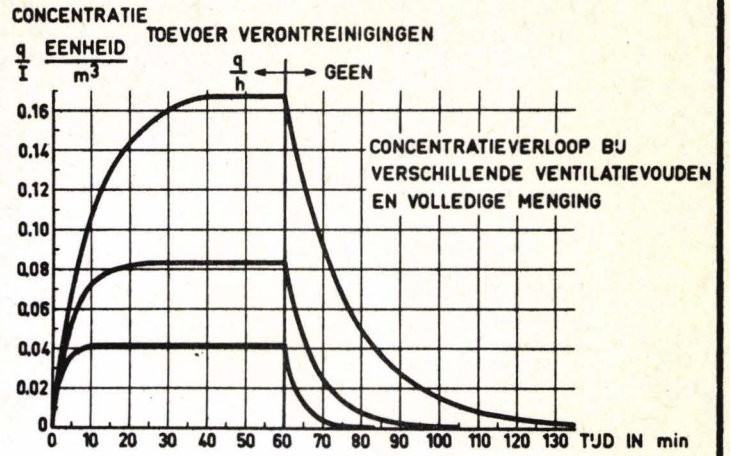


FIG. 8

VERBAND TUSSEN VENTILATIEVOUD EN STOFCONCENTRATIE BIJ VOLLEDIGE MINGING EN CONSTANTE STOFTOEVOER

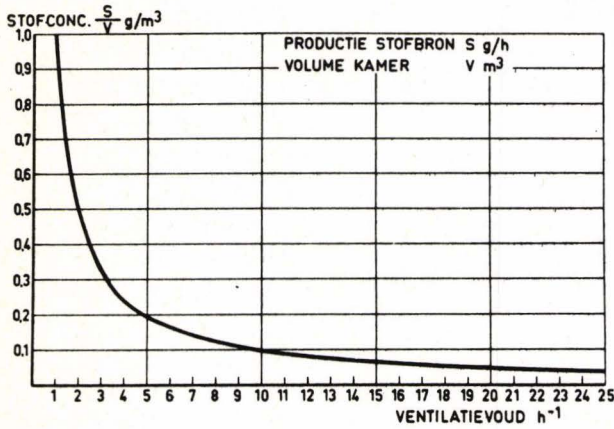


FIG. 9

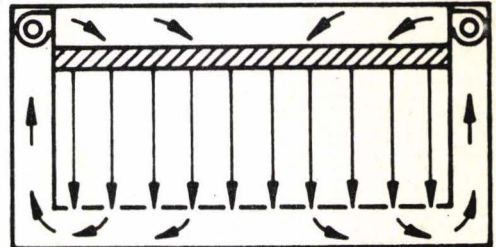


FIG. 10

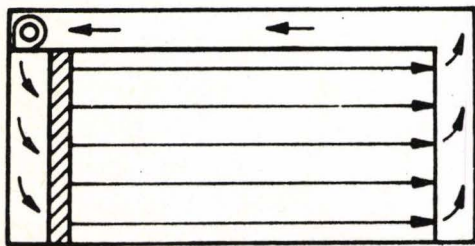


FIG. 11

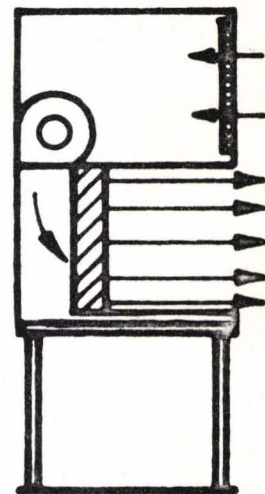


FIG. 12