

Contaminant removal efficiency, ontwerpparameter in cleanrooms

Citation for published version (APA):

Molenaar, P. C. A., Loomans, M., Joosten, P. H. J., & Kort, H. (2019). Contaminant removal efficiency, ontwerpparameter in cleanrooms. *C2MGZN*, 2019(1), 8-11.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2019

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

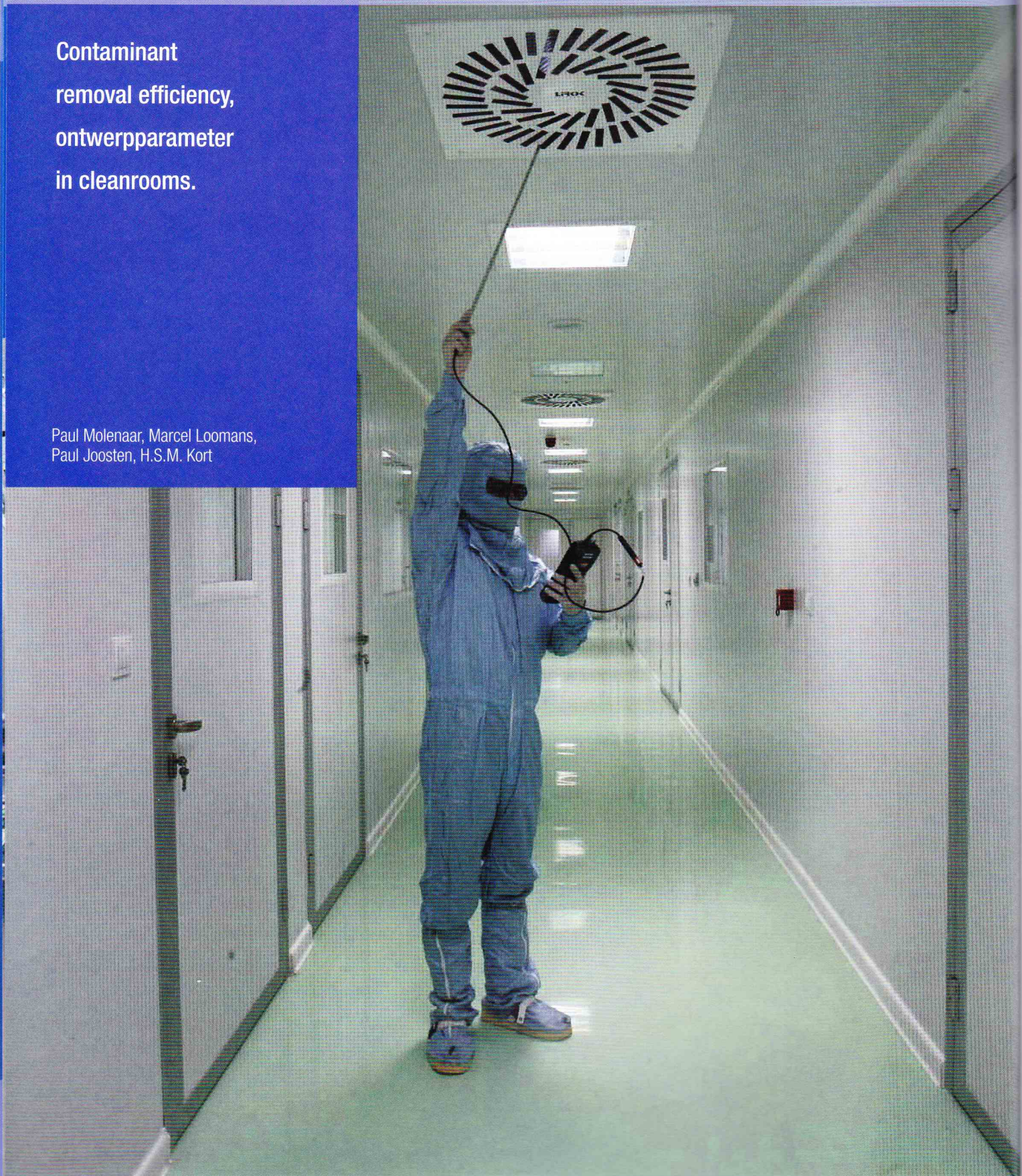
openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

ONTWERPPARAMETER

Contaminant
removal efficiency,
ontwerpparameter
in cleanrooms.

Paul Molenaar, Marcel Loomans,
Paul Joosten, H.S.M. Kort



Het toepassen van swirl diffusers zorgt voor menging in de ruimte.

In cleanrooms is naast het ventilatievoud ook de ventilatie efficiëntie een punt van aandacht [2]. Dit kan uitgedrukt worden in verschillende prestatie indicatoren. Voor een cleanroom is de zogenaamde contaminant removal efficiency (ϵ^c) [3] een belangrijke indicator. Deze geeft weer hoe efficiënt de contaminatie (bijv. deeltjes) uit een cleanroom verwijderd wordt.

Deze is gedefinieerd als:

$$\epsilon^c = \frac{C_{\text{exit}} - C_s}{C(t) - C_s}$$

Waarbij:

- ϵ^c = Contaminant removal efficiency [-]
- C_{exit} = Retourlucht deeltjesconcentratie [p/m^3]
- C_s = Lucht toevoer deeltjesconcentratie (na het filter) [p/m^3]
- $C(t)$ = Gemiddelde deeltjesconcentratie in de ruimte [p/m^3]

Een identieke cleanroom met een hogere contaminant removal efficiency (ϵ^c) heeft een lagere gemiddelde deeltjesconcentratie in de ruimte. In een volledig en perfect gemengde situatie zal $\epsilon^c = 1$ zijn. In een efficiëntere situatie is $\epsilon^c > 1$, terwijl in geval van bijvoorbeeld kortsluiting tussen toe- en afvoer $\epsilon^c < 1$ kan worden. Deze laatste situatie dient vanzelfsprekend voorkomen te worden. Maar een hogere waarde voor ϵ^c betekent dat met minder lucht eenzelfde resultaat verkregen zou kunnen worden als bij volledig mengen. Dit heeft vervolgens een effect op bijvoorbeeld het energiegebruik.

Ondanks de eenvoud van het principe is het niet eenvoudig om de contaminant removal efficiency te bepalen. Ze wordt beïnvloed door ontwerpparameters van de ruimte en de luchttoevoer naar de ruimte, zoals bijvoorbeeld: roostertype, richting van de schoepen van het wervelrooster, ventilatievoud, luchttoevoer- en afvoerpositie, de vorm en inrichting van de ruimte, en de positie van de verontreinigingsbron(nen).

In dit deelonderzoek is gekeken naar de contaminant removal efficiency in een cleanroom laboratorium situatie (mock-up). Hierbij is onderzocht hoe gevoelig ϵ^c is voor verschillende parameters die deze prestatie

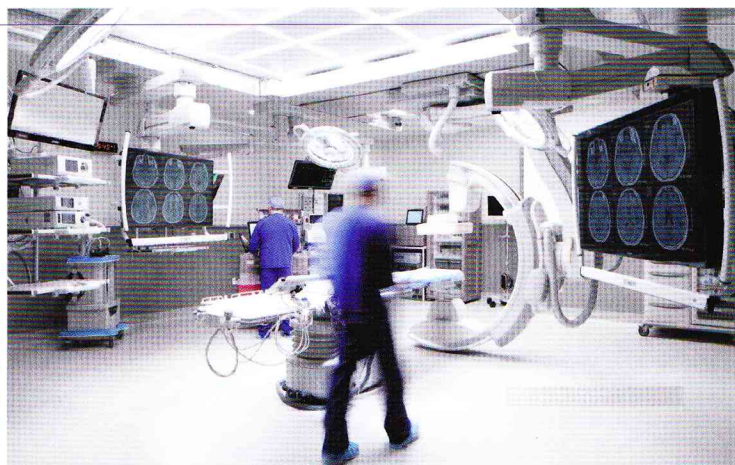
beïnvloeden. Doel was om vanuit deze analyse tot ontwerpaanbevelingen te komen om de efficiëntie te optimaliseren en een mogelijke energiebesparing af te leiden. Uitgangspunt is natuurlijk dat de prestaties op luchtkwaliteitsgebied gelijk blijven. Het onderzoek vormt onderdeel van het afstudeerwerk van de eerste auteur aan de TU Eindhoven [2]. In een aanvullend artikel wordt het andere deelonderzoek beschreven dat focust op vraaggestuurde filtratie.

De contaminant removal efficiency van een ruimte kan zowel langs experimentele weg als met behulp van simulatie bepaald worden. Bij simulatie moet dan al snel gedacht worden aan technieken die de luchtstroming in een ruimte kunnen simuleren (Computational Fluid Dynamics [CFD]). Dit zijn complexe technieken en deze vragen in alle gevallen om een goede validatie voordat verdere analyses uitgevoerd kunnen worden.

Complexiteit wordt onder andere gevonden in de randvoorwaarden die in detail in het model ingevoerd moeten worden en de modellering van turbulentie waarvan normaal gesproken sprake is [4]. Experimenten kennen hun beperking vooral in het aantal meetpunten. Ook daar geldt dat de randvoorwaarden steeds goed gecontroleerd moeten worden.

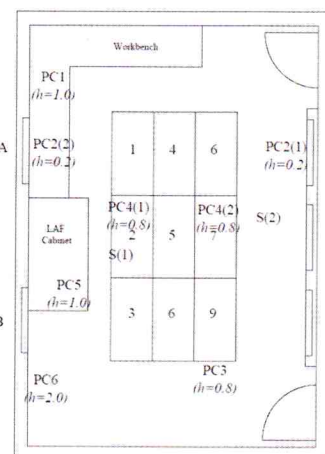
In dit onderzoek is ervoor gekozen om metingen uit te voeren in plaats van simulaties. De redenen hiervoor zijn de beschikbaarheid van een mock-up waarin dergelijke metingen konden worden uitgevoerd en de eenvoud waarmee verschillende varianten in het experimentele onderzoek konden worden meegenomen. Deze waren in lijn met de vragen die binnen het onderzoek gesteld zijn.

Swirl diffuser technologie in lab setting



ONTWERP PARAMETER

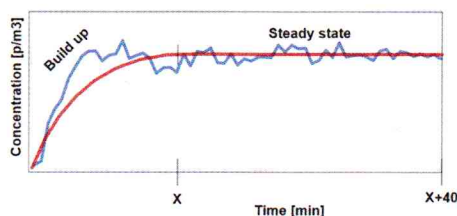
-vervolg-



Figuur 1 (boven): Foto van de mock-up van de laboratorium cleanroom situatie waarin de metingen zijn uitgevoerd [links] en een plattegrond van de ruimte [rechts] waarin de locatie van de deeltjestellers, (PC), ventilatie/filter units (FFUs; 1-9), afvoerroosters (A-E) en bronpositie (S) zijn aangegeven. 'h' is de hoogte van de meetpositie ten opzichte van de vloer.

Figuur 1 geeft een impressie van de mock-up waarin het onderzoek is uitgevoerd en de bijbehorende plattegrond met informatie over de uitgevoerde metingen. Om de gemiddelde deeltjesconcentratie op een punt in de ruimte en de deeltjesconcentratie van de retourlucht van Formule 1 te kunnen vaststellen, wordt een aerosol generator als bron in de ruimte gebruikt die steeds op dezelfde hoeveelheid deeltjesuitstoot is ingesteld. Hierdoor worden de cases vergeleken met dezelfde bronsterkte.

Bij het starten van een case wordt de aerosol generator aangezet en zal de deeltjesconcentratie na verloop van tijd overal in de cleanroom een bepaalde waarde aannemen, die ongeveer constant blijft. De deeltjesconcentratie is dan in een steady state situatie. De steady state fase is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Schematische weergave van de deeltjesconcentratie gedurende een test. Waarbij rood het theoretische verloop toont en blauw meetwaarden zijn van een uitgevoerde test.

Om de gemiddelde deeltjesconcentratie in de ruimte te kunnen berekenen zijn verschillende deeltjestellers opgesteld in de ruimte. Vóór het afzuigrooster in de ruimte is ook een deeltjesteller geplaatst om de retourlucht deeltjesconcentratie te bepalen. Daarnaast kan per punt, lokaal, de contaminant removal efficiency worden bepaald op basis van de gemeten waarden.

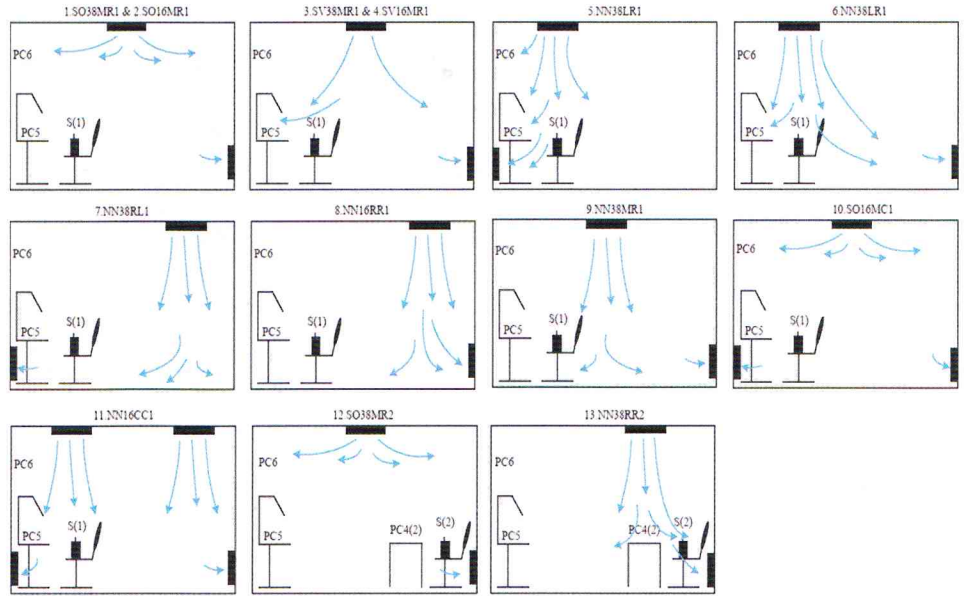
In totaal zijn 13 cases onderzocht. De metingen zijn voor 11 van de 13 cases herhaald. In Figuur 3 wordt een overzicht gegeven van de cases. Met pijlen wordt een impressie gegeven van het veronderstelde verloop van de luchtstroming in die situatie. Varianten hebben betrekking op het gebruik van wel of geen swirl diffuser, swirl hoek (naar buiten, naar beneden), hoeveelheid ventilatie (Air Change Rate [ACR] 16 of 38 h⁻¹) en gebruik van Fan Filter Units (FFU; aantal en positie). Ook het effect van de positie van de afvoer is onderzocht (steeds twee afvoerroosters open; half afgedekt in geval van lage waarde ACR). Tot slot is ook de bronpositie verplaatst. Case 1 en 2 (Swirl diffuser, naar buiten, ACR respectievelijk 38 en 16 h⁻¹) zijn typische cases zoals die in de praktijk in farmaceutische cleanrooms worden aangetroffen.

Een overzicht van de resultaten van de metingen is weergegeven in Tabel 1. Hierin zijn de lokale waarden voor de contaminant removal efficiency samengevat

Tabel 1 (rechts): Lokale ϵ° PC# voor alle onderzochte meetpunten PC en de ruimtegemiddelde ϵ° contaminant removal efficiency voor de 13 onderzochte cases (S: Swirl diffuser, N: geen diffuser, O: swirl hoek naar buiten, V: swirl hoek verticaal; 16/38: ACR; M: toevoerpositie midden [rij 4-6], R: rechts [rij 7-9], L: links [rij 1-3], C: combinatie rij links en rechts; R: afvoer rechts [positie C en E], L: links [positie A en B], C: combinatie rechts en links; 1/2: positie van de bron en PC4 [zie Figuur 1]).

Case	PC1	PC3	PC4	PC5	PC6	Overall ϵ
1.SO38MR1	0.92 / 0.78	1.13 / 1.44	0.96 / 0.94	0.79 / 0.98	1.30 / 1.62	0.99 / 1.07
2.SO16MR1	0.80 / 0.81	0.94 / 1.10	0.92 / 0.93	0.88 / 0.75	0.92 / 1.05	0.86 / 0.94
3.SV38MR1	0.86	0.49	0.61	0.24	0.35	0.42
4.SV16MR1	1.04	1.12	1.03	0.52	1.19	0.90
5.NN38LL1	0.70 / 0.76	1.18 / 1.61	1.06 / 0.89	0.13 / 0.13	1.56 / 1.88	0.43 / 0.44
6.NN38LR1	0.63 / 0.52	0.85 / 0.90	0.49 / 0.81	0.19 / 0.18	0.19 / 0.20	0.33 / 0.33
7.NN38RL1	0.43 / 0.50	1.67 / 3.80	1.74 / 0.51	0.48 / 0.44	1.66 / 2.54	0.81 / 0.73
8.NN16RR1	1.05 / 1.10	1.45 / 1.37	1.07 / 1.05	0.77 / 0.91	1.18 / 1.39	1.06 / 1.13
10.SO16MC1	0.83 / 0.93	1.19 / 1.07	0.91 / 0.84	0.82 / 0.91	1.02 / 1.24	0.94 / 0.98
11.NN16CC1	0.88 / 0.61	1.40 / 1.58	0.57 / 0.69	1.08 / 1.25	2.15 / 1.54	1.00 / 0.97
12.SO38MR2	1.76 / 1.29	0.63 / 0.43	0.11 / 0.11	0.71 / 0.51	1.06 / 0.77	0.36 / 0.32
13.NN38RR2	0.77 / 1.03	2.26 / 2.68	7.01 / 7.58	1.44 / 1.87	1.93 / 2.31	1.62 / 2.05

Figuur 3 (rechts) Onderzochte cases, inclusief een impressie van het veronderstelde verloop van de luchtstroming behorende bij de betreffende case (S: bron; PC: meetpunt deeltjesteller; zie Figuur 2 voor aanvullende informatie over de overige meetpunten).



en de gemiddelden voor de ruimte op basis van de zes meetpunten.

Tabel 1 laat zien dat ruimtgemiddelde waarden voor de contaminant removal efficiency worden behaald tussen de 0,33 en 1,84. Lokaal kunnen echter waarden worden bereikt die duidelijk hoger zijn. In het algemeen geldt echter dat de onderzochte cases, met uitzondering van case 13 (38 h-1, FFU positie 7-9, afvoer C en E, bronpositie S(2)), weinig beter presteren dan een mengsituatie.

In het algemeen rekenen ingenieurs met een contaminant removal efficiency van 0,7 voor het dimensioneren van cleanrooms [5]. Dit betekent dat het gehanteerde debiet op basis van de verwachte bronsterkte wordt vergroot met 1/0,7 ten opzichte van een theoretisch volledige gemengde situatie. De resultaten in Tabel 1 laten zien dat in verschillende cases deze marge te ruim is. Zo wordt voor case 2 (16-voudig met wervelroosters, toevoer lucht in het midden van de ruimte), die het meest in de buurt komt van de gangbare situatie in GMP C faciliteiten, een gemiddelde contaminant removal efficiency behaald van 0,9. Uitgaande van de ontwerpwaarde van 0,7 betekent dit dat op een bijna 30% hoger debiet wordt ontworpen dan noodzakelijk. Hierbij dient wel vermeld te worden dat er laag werd afgezogen in de experimenten.

Lagere waarden voor de contaminant removal efficiency worden behaald wanneer de ruimteventilatie de gegenereerde vervuiling uit de aerosol generator over het werkgebied heen blaast. In cases waarbij wervelroosters met een normale schoeprichting (naar buiten gericht) werden gebruikt was dit geen probleem. De lucht wordt dan voor een groot deel langs het plafond naar de zijkanalen van de ruimtes geblazen waardoor een mengsituatie in de ruimte ontstaat.

De hoogste contaminant removal efficiency wordt

behaald met een opstelling waarbij lucht zonder rooster direct boven een werkbank wordt ingebracht. De vervuiling, gegenereerd op een plek naast de werkbank (waar een werknemer zich normaal zou bevinden), wordt in dat geval effectief achter de bron afgezogen. Dit is geïllustreerd in Figuur 3 met case 13. Dit resulteert in de hoogste contaminant removal efficiency van 1,83.

Een belangrijke opmerking hierbij is dat de positie van de bron een cruciale rol speelt in combinatie met de inrichting van de ventilatievoorzieningen in de ruimte. Voor case 13 werkt dit positief. Bij andere cases wordt een minder goed resultaat behaald wanneer de bron verplaatst wordt bij gelijkblijvende ventilatievoorzieningen. Dit is vooral kritisch bij toepassing van een toevoer die ontworpen is om direct de bron te ventileren, zoals in het geval van toepassing van FFUs (met downflow karakteristiek). In dat geval mogen grote gradiënten in de deeltjesconcentratie in de ruimte verwacht worden. Dit is in principe niet in lijn met de eisen volgens ISO 14644 [6] die stelt dat de deeltjesconcentratie op alle punten in de ruimte moet voldoen aan de gestelde eisen voor de betreffende cleanroom. Dit maakt het lastiger om in deze situatie een lager ventilatievoud te realiseren, hoewel dit wel mogelijk zou zijn op basis van de situatie op de werkplek.

Toepassing van swirl diffusers zorgt voor menging in de ruimte. De positie van de bron wordt daardoor minder kritisch en de waarden voor de contaminant removal efficiency wijken daardoor niet veel af van een mengsituatie. Doordat de bronpositie minder kritisch is, is dit wel een meer robuuste oplossing voor de betreffende cleanroom. Dit sluit aan op de bevindingen van Lenegan [7]. Vanuit energetisch oogpunt is de ontwerpparameter voor de contaminant removal efficiency die wordt gebruikt bij de dimensionering, voor de onderzochte case, echter wel aan de (te) veilige kant. Hier is optimalisatie mogelijk. ◀

Bronnen:

1. ISPE, Baseline Guide: Volume 3 Sterile Product Manufacturing Facilities, vol. 3 (2011).
2. Molenaar PCA. Ventilation efficiency improvement in pharmaceutical cleanrooms for energy demand reduction. Eindhoven University of Technology. 28 Feb 2017. Master thesis (2017) https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/58774864/Molenaar_0785502.pdf
3. Yaglou CP en Witheridge WN. Ventilation Requirements. ASHVE Trans. vol. 42. no. February, pp. 423-436 (1937)
4. Dijkstra D, Loomans MGLC, Hensen JLM, Cremers BE. Ventilatie-effectiviteit bij mechanische balansventilatie: parameterstudie voor grotere ruimtes in woningen. TWL Magazine. Apr 23;45(4):26-29 (2016)
5. Camfil Farr. Clean Room Design Standards & Energy Optimization. Haslingden (2012)
6. Nederlands Normalisatie-instituut. NEN-EN-ISO 14644-1 (2016)
7. N. Lenegan. Diffuser Performance. Clean Air Contain. Rev. no. 18. pp. 8-13 (2014)