

Auteurs

Dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans^a, ir. P.C.A. (Paul) Molenaar^{a,b}, ing. P.H.J. (Paul) Joosten MBA^b, prof.dr.ir. H.S.M. (Helianthe) Kort^a

^a Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment, Building Performance IEQ-Health
^b Kuijpers PHF Services B.V., Controlled Environments, 's-Hertogenbosch

Energiebesparing in cleanrooms: is ventilatie het laaghangend fruit?

In cleanrooms worden hoge ventilatievouden gehanteerd. Dit is in lijn met de beschikbare richtlijnen [1]. Normaal gesproken worden de daarvoor benodigde debieten 24/7 gerealiseerd, zodat de cleanroom continu op het gewenste niveau presteert. Dit is daarmee een energie-intensieve activiteit. Om het energiegebruik te reduceren zijn in het kader van een afstudeeronderzoek mogelijkheden onderzocht waarbij het debiet wordt verlaagd bij gelijkblijvende prestaties op luchtkwaliteitsgebied; nachtreductie, sturing op deeltjesconcentratie en op basis van bezetting. Metingen zijn uitgevoerd en simulaties zijn ingezet om de mogelijkheden te beoordelen. Hieruit blijkt dat voor de onderzochte farmaceutische cleanrooms tot 90% energiebesparing mogelijk is. Overdimensionering en beperkt gebruik zijn de oorzaak hiervan. Sturing op bezetting wordt als meest praktisch en effectief beoordeeld voor de onderzochte situaties. In dit artikel zal met name aandacht worden besteed aan de effecten van een aangepast ventilatiedebiet. De hoofdconclusies van het onderzoek naar de ventilatie-efficiëntie worden kort benoemd. Meer informatie over dit deel van het onderzoek is te vinden in [2].

De noodzaak van grote debieten in cleanrooms is mede afhankelijk van het type gebruik (de belasting) en de tijdsduur. Resultaat op dit moment is echter dat, bijvoorbeeld, een GMP B ruimte tot meer dan 25 keer meer energie gebruikt dan een niet-geclassificeerde ruimte [3]. Of het gehanteerde ventilatievoud daarbij representatief is? Dat is vaak nog een vraag. In de ontwerpfase is het veelal nog onduidelijk wat de exacte belasting (deeltjesproductie) zal zijn [4]. Als ontwerper zullen dan normaal gesproken, en noodgedwongen,



wat zekerheden worden ingebouwd ten aanzien van de capaciteit.

Om het ventilatievoud/ventilatiedebiet in cleanrooms te reduceren, bij gelijkblijvende prestaties op luchtkwaliteitsgebied, zijn verschillende opties onderzocht: nachtreductie, deeltjesconcentratie gestuurde ventilatie en gestuurde ventilatie op basis van bezetting. Hiertoe zijn metingen uitgevoerd in verschillende GMP ruimtes. Dit over een langere periode en met verschillende bezetting. Overeenkomst in de onderzochte cleanrooms is dat het farmaceutische cleanrooms betrof. Een volledige beschrijving van de opzet van de metingen is terug te vinden in [2]. Daarnaast is een simulatiemodel gemaakt op basis van [5] om de deeltjesconcentratie te onderzoeken bij toepassing van verschillende randvoorwaarden.

In Figuur 1 is een typisch resultaat afgebeeld van de gemeten deeltjesconcentratie als functie van de tijd (een halve dag). Resultaten van twee deeltjestellers zijn weergegeven evenals de bezetting van de cleanroom als

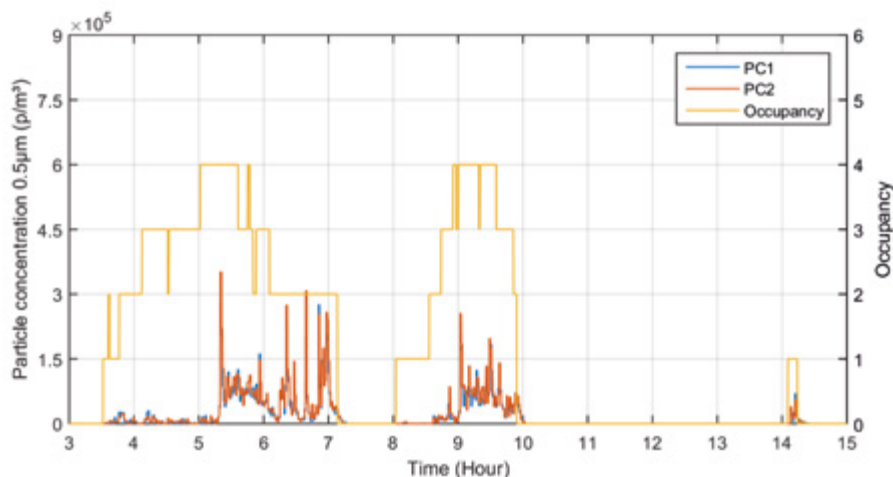


Figuur 1 laat zien dat er deeltjes worden gemeten door menselijke activiteiten in de onderzochte cleanroom. In dit geval blijven de gemeten concentraties onder de maximaal geaccepteerde waarde. Te zien is dat de deeltjesconcentratie altijd 10 keer lager is dan maximaal toegestaan. Enkele pieken geven aan dat de positie van de bron en instationaire activiteiten ervoor zorgen dat niet altijd een (theoretisch) uniforme situatie op de meetpunten gemeten wordt. Dit is representatief voor de andere cleanrooms die zijn bemeaten.

Wanneer alle personen de cleanroom verlaten reduceert de deeltjesconcentratie naar nul binnen 20 minuten (theoretisch is dit afhankelijk van de

hersteltijd, het gehanteerde ventilatievoud). In alle onderzochte GMP ruimtes wordt een deeltjesconcentratie (deeltjes $\geq 0,5\mu\text{m}$) nabij nul gemeten bij afwezigheid van de werknemers. Daarmee is duidelijk dat de personen en hun activiteiten in de cleanroom in deze situatie de enige bron zijn. Dit is natuurlijk belangrijk om vast te stellen wanneer erover gedacht wordt om het ventilatievoud te reduceren.

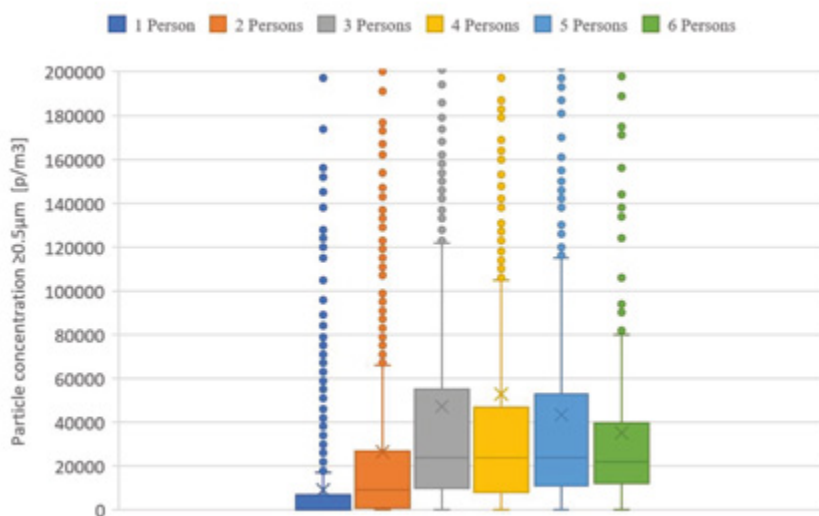
Figuur 2 laat zien dat de deeltjesconcentratie niet vanzelfsprekend toeneemt met het toenemen van het aantal personen. Uit de metingen blijkt dat een toename



Figuur 1: Gemeten deeltjesconcentratie [linker as] en het aantal aanwezige personen [rechter as] in een onderzochte cleanroom ruimte gedurende een periode van 12 uur.

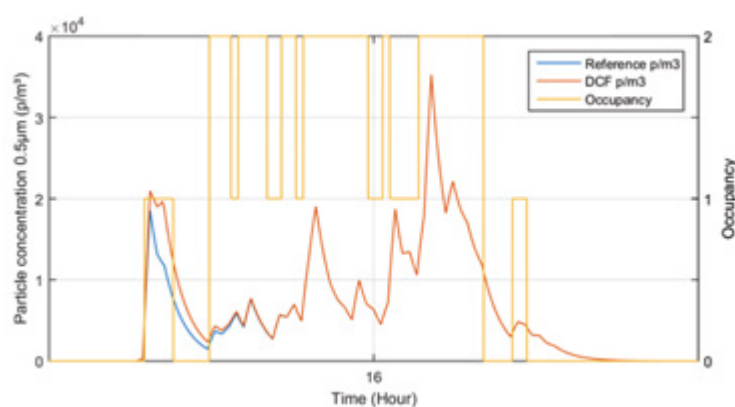
functie van de tijd. Het aantal personen op een bepaald moment kan van de rechteras worden afgelezen. Deze onderzochte cleanroom was ontworpen op GMP C. Dat betekent dat de deeltjesconcentratie bij gebruik de waarde van $3.52 \cdot 10^6$ deeltjes/ m^3 [$\geq 0.5 \mu\text{m}$] niet mocht overschrijden.

Uit de meetdata is in Figuur 2 voor een van de onderzochte cleanrooms afgeleid wat de verdeling is van de deeltjesconcentratie in de cleanroom als functie van het aantal personen in de cleanroom. Dit is weergegeven in boxplots om de variatie in de meetwaardes ook zichtbaar te maken.



Figuur 2: Boxplot van de gemeten deeltjesconcentratie ten opzichte van het aantal personen aanwezig in de cleanroom voor een van de onderzochte cleanrooms.

van 3 tot 6 personen niet tot significante verschillen in de deeltjesconcentratie leidt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat aan het begin en eind van de shift mensen aan het opstarten en opruimen zijn van, in dit geval, de productie. Omdat niet iedereen tegelijkertijd begint of stopt zijn bij het opstarten of opruimen vaak minder mensen aanwezig in de cleanroom. Tijdens deze activiteiten zullen er waarschijnlijk echter wel meer deeltjes geproduceerd worden vanwege die activiteiten. Dit is goed te zien in Figuur 1 aan het eind van de dag, wanneer er maar één schoonmaker aanwezig is, en toch een relatief hoge deeltjesconcentratie gemeten wordt.



Figuur 3: Simulatieresultaat van vraaggestuurde filtratie (DCF) (GMP-eis < 3.5×10^6 deeltjes).

Cleanroom	% bezettingstijd	Reductie debiet % van de tijd	% Overall ventilator energie besparing
Faciliteit H: B	1,8%	96,1%	93,6%
Faciliteit H: C	3,2%	88,9%	86,8%
Faciliteit R	22,5%	70,0%	68,1%

Tabel 1: Berekende energiebesparingsmogelijkheid voor de ventilator voor de onderzochte cleanrooms.

Figuur 3 laat een voorbeeld van een simulatieresultaat zien waarbij gebruik is gemaakt van vraaggestuurde filtratie (DCF: Demand Controlled Filtration) uitgaande van informatie zoals verkregen uit de metingen ('Reference'). In deze simulatie is ervoor gekozen om bij bezetting van de cleanroom de ventilatie naar de ontwerpwaarde op te voeren, ongeacht het aantal personen. Aangenomen is dat het gewenste ventilatievoud 20 h^{-1} is en bij verlaging terugvalt naar 6 h^{-1} . Het effect op de drukhiërarchie is hierbij buiten beschouwing gelaten. Deze zal afnemen zonder verdere maatregelen. Terugval vindt plaats 30 minuten nadat er geen bezetting meer is gedetecteerd en de cleanroom dus leeg is. Dit verzekert dat, bij het

gegeven ventilatievoud, de deeltjesconcentratie weer naar nul gaat. Uitgangspunt hierbij is dat de mens de bron is en geen andere bronnen in de ruimte aanwezig zijn of van buiten komen. Tabel 1 laat vervolgens zien welke energiebesparingen mogelijk zijn wanneer deze strategie worden toegepast op de verschillende onderzochte cleanrooms. Deze energiebesparing betreft enkel de energie voor de ventilator, op basis van de affinity law.

Figuur 3 laat zien dat vraaggestuurde ventilatie in staat is om de prestatie van de cleanroom op het gewenste niveau te houden, vergelijkbaar aan voltijds ventilatie. Wel is zichtbaar dat bij de start van een bezetting er een hogere concentratie wordt berekend dan bij een continue situatie. Dit heeft alles te maken met de tijd die nodig is om het systeem op het gewenste (ontworpen) niveau te krijgen. In dit geval duurt het 150 seconden voordat de installatie het gewenste ventilatievoud weet te realiseren. Verondersteld wordt dat dit een voldoende veilig uitgangspunt is.

Op basis van de veronderstelling dat vraaggestuurde filtratie (DCF) mogelijk is geeft Tabel 1 aan dat heel wat besparing mogelijk is. Duidelijk is dat deze besparingen een nauwe relatie hebben met de mate van gebruik van de cleanroom. Voor deze onderzochte farmaceutische cleanrooms lijkt deze oplossing zeker interessant. Ter verduidelijking, de besparingen kunnen worden bereikt bij gelijkblijvende prestaties van de cleanroom ten aanzien van de luchtkwaliteit in gebruikstijd.

Een alternatief is om direct op de deeltjesconcentratie in de cleanroom te regelen. Uit het onderzoek bleek dat het niet altijd mogelijk was om een significante toename van de deeltjesconcentratie aan te tonen bij een toename van het aantal personen in de cleanroom. Daarnaast wordt de deeltjesconcentratie meestal lokaal gemeten met een deeltjesteller met een relatieve lage flow (0.1 cfm). Daardoor kunnen lokaal hogere of lagere concentraties gemeten worden en is deze dus niet representatief voor de ruimte als geheel. Dit heeft ondermeer te maken met de ventilatie-efficiëntie en de positie van de bron(nen). Daarnaast fluctueert de gemeten concentratie regelmatig. Zie onder andere de pieken zoals in Figuur 1. Dit resulteert mogelijk in een onstabiele of trage regeling.

De studie naar de ventilatie-efficiëntie (uitgedrukt in de contaminant removal efficiency) laat zien dat in de huidige ontwerprichtlijnen een conservatieve veronderstelling aangenomen wordt. Hierdoor is tot ongeveer



30% meer lucht benodigd dan uit de metingen daar- naar, als onderdeel van dit onderzoek, noodzakelijk lijkt. Hierbij wordt uitgegaan van het gebruik van swirl diffusers die een zo goed mogelijke menging in de ruimte proberen te bewerkstelligen. Het gebruik van meer gerichte ventilatie, bijvoorbeeld via fan filter units met een downflow karakteristiek en gerichte afzuiging, zou tot nog efficiëntere oplossingen kunnen leiden. Echter binnen de huidige normgeving, voor een ruimte als geheel, is een dergelijke oplossing in een cleanroom nog niet acceptabel.

Terugkerend naar het ventilatievoud; Het sturen van het ventilatievoud waarbij alleen onderscheid gemaakt wordt tussen een bezette en onbezette cleanroom lijkt op dit moment de meeste eenvoudige en effectieve manier om tot significante energiebesparingen te komen. Dit is bijvoorbeeld eenvoudig toepasbaar wanneer er lichtbewegings-sensoren aanwezig zijn ten behoeve van de verlichting. Hierop kan dan ook de installatie worden aangestuurd om het gewenste ventilatievoud te realiseren. Na bijvoorbeeld een half uur waarin geen detectie van personen heeft plaatsgevonden kan de ventilatie weer worden teruggebracht naar een lager niveau. Op deze manier is de hersteltijd

(typisch <20 minuten voor een dergelijke ruimte) ook verdisconteerd en blijft de cleanroom functioneren volgens de gestelde eisen. Omdat het effect van een aangepaste drukhiërarchie niet is onderzocht binnen deze studie is bij de toepassing van deze oplossing wel een actieve drukregeling in de cleanroom gewenst om de drukhiërarchie te handhaven. Deze moet ook buiten gebruik gegarandeerd blijven om verontreiniging vanaf buiten te voorkomen.

Het reduceren van het energieverbruik voor ventilatie (en recirculatie) door sturing op basis van bezetting is vooral effectief in ruimtes die alleen voor bepaalde productieprocessen gebruikt worden en dus regelmatige en wat langere onderbrekingen in de bezetting kennen. In dit onderzoek bleek een GMP B ruimte gedurende de meetperiode slechts voor 1,8% van de tijd in gebruik. Ondertussen werd de ruimte wel continu 40-voudig geventileerd. Een besparing van meer dan 90% op energiegebruik van de ventilator lijkt hier eenvoudig mogelijk. In de cleanroom faciliteit die een meer normaal bezettingspatroon heeft van 40 uur per week is een energiebesparing van 68% op het verbruik van de ventilator mogelijk.

In een vervolgonderzoek op dit werk zijn intussen een tweetal aspecten meer in detail onderzocht [6]. Enerzijds is onderzocht in hoeverre het reduceren van de drukhiërarchie leidt tot (extra) vervuiling van de cleanroom indien deze niet in gebruik is. Anderzijds is gekeken naar de energiebesparing die mogelijk is voor het gehele HVAC-systeem zoals dat in gebruik is in een typische cleanroom. Het conditioneren van de lucht wordt hier dus, naast de ventilator-energie, meegenomen. In dat verband is bijvoorbeeld ook het effect onderzocht van de strenge eisen aan de relatieve vochtigheid in dergelijke ruimtes. Het is de intentie om de resultaten van dit onderzoek binnen afzienbare tijd te publiceren.

Referenties

1. ISPE, Baseline Guide: Volume 3 Sterile Product Manufacturing Facilities, vol. 3 (2011)
2. Loomans MGLC, Molenaar PCA, Kort HSM, Joosten PHJ. Energy demand reduction in pharmaceutical cleanrooms through optimization of ventilation. Energy and Buildings. Vol.202 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109346>
3. Fedotov A. Saving energy in cleanrooms. Cleanroom Technol. vol. 22. no. 8. pp. 14–18 (2014)
4. Khoo CY, Lee CC en Hu SC. An experimental study on the influences of air change rate and free area ratio of raised-floor on cleanroom particle concentrations. Build. Environ. vol. 48, no. 1. pp. 84–88 (2012)
5. Whyte W, Whyte W en Eaton T. The application of the ventilation equations to cleanrooms Part 1: The equations. Clean Air Contain. Rev., vol. 12, no. October, pp. 4–8 (2012).
6. Ludlage B. Optimizing Energy Demand during the Non-Operational Hours in a Cleanroom. Eindhoven University of Technology, Eindhoven; 2019.