

Auteurs

Ludlage, T.B.J.^{a,b}, Loomans, M.G.L.C.^a, van den Oever, H.^b, Molenaar, P.C.A.^b, Kort, H.S.M.^a, Joosten, P.H.J.^b^a. Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment, Building Performance IEQ-Health, the Netherlands^b. Kuijpers PHF Services B.V., Controlled Environments, 's-Hertogenbosch, the Netherlands*Een Green Deal voor cleanrooms*

Aanzienlijk energiebesparingspotentieel in cleanrooms binnen handbereik

Het gebruik van cleanrooms neemt toe en de verwachting is dat deze groei in het komende decennium zal aanhouden. Vergeleken met een gemiddeld kantoorgebouw verbruiken cleanrooms grote hoeveelheden energie vanwege de hoge ventilatie- en recirculatievouden en de strenge eisen die worden gesteld aan de luchtbehandeling. In dit onderzoek hebben we gekeken tot op welke hoogte de energievraag van cleanrooms geoptimaliseerd kan worden en zo kan bijdragen aan de Europese Green Deal om te zorgen voor een duurzamere cleanroom-industrie.

De hier beschreven studie bouwt voort op de resultaten die eerder zijn beschreven in [1] en [2]. In die studies is met behulp van experimenten aangetoond dat besparingen op het energiegebruik goed mogelijk zijn, zonder dat dit een negatief effect heeft op de prestatie van de cleanroom. In de hier beschreven studie zijn simulaties ingezet om een antwoord te zoeken op de vraag hoe die kennis het energiegebruik van een cleanroom in zijn totaliteit beïnvloedt en welke parameters daarbij nog gevoelig zijn.

Praktische implicaties

- Toepassing van vraaggestuurde filtratie (demand controlled filtration [DCF]) is een manier om relatief eenvoudig meer dan 50% energie te besparen op de luchtbehandeling van cleanrooms. De luchtkwaliteitsprestatie van de cleanroom wordt hierbij niet negatief beïnvloed.
- In het ontwerpproces zouden randvoorwaarden voor een cleanroom, zoals temperatuur en RV, maar ook het luchtverversingsvoud (ventilatie+recirculatie) en de gebruikstijd meer aandacht moeten krijgen. Van daaruit kunnen dan energiebesparingsmogelijkheden worden gevonden. Grote besparingen zijn in dat geval mogelijk.

Inleiding

Cleanrooms en gecontroleerde omgevingen worden op grote schaal toegepast in vele industrieën. Zie Figuur 1 voor een impressie van een cleanroom. Cleanrooms zijn energie-intensieve faciliteiten. Zo verbruikt een farmaceutische cleanroomfaciliteit tot 25 keer meer energie dan een gemiddeld commercieel gebouw. 50-75% van de elektrische energievraag is daarbij afkomstig van het luchtbehandelingssysteem. De belangrijkste reden voor het hoge verbruik is de hoge luchtverversingssnelheid (ACR; ventilatie + recirculatie [HEPA gefilterd]) die de luchtkwaliteit van deze ruimtes moet garanderen [3].

Afhankelijk van de klasse van de cleanroom worden gewoonlijk twee ventilatiemethoden gebruikt om de concentratie aan verontreiniging in de lucht te controleren: door een unidirectionele luchtstroom (UDAF) of door verdunning middels een niet-UDAF. De luchtkwaliteit in (farmaceutische) cleanrooms is gebaseerd op de ISO 14644-1 en GMP-classificatie richtlijnen [4,5] en wordt uitgedrukt in een maximum concentratie aan deeltjes dat in de lucht aanwezig mag zijn. Daarbij wordt nog een onderscheid gemaakt in activiteit: "in gebruik" (operationeel) of "in rust" (niet-operationeel), want mensen zijn in veel gevallen de grootste vervuilsbron [6]. Mengende systemen (niet-UDAF) worden vaak gebruikt voor cleanrooms met iets minder hoge eisen voor de luchtkwaliteit, bijvoorbeeld GMP B of C [4].

Naast de grote luchthoeveelheden die nodig zijn om de deeltjesconcentratie laag te houden, zijn er meer aspecten in een cleanroom die de energievraag kunnen opstuwten, zoals eisen aan de temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) voor processen en persoonlijk comfort. Maar ook de drukhiërarchie is een belangrijk aspect in de cleanroom [7].

De energie-efficiëntie van een cleanroom-installatie, met inbegrip van de luchtbehandeling, is bij het ontwerp tot nu toe veelal

ondergeschikt geweest aan de betrouwbaarheid en het rendement van het productieproces. Omdat de deeltjesproductie vaak niet bekend is tijdens het ontwerpproces worden meestal voorgeschreven waarden voor luchtdelbieten van de International Society of Pharmaceutical Engineering [8] gebruikt. Dat leidt vaak tot overdimensionering. De binnenluchtkwaliteit is daarmee ruimschoots op orde, maar het heeft ook een onnodig negatief effect op de energievraag door extra ventilatie, recirculatie en de extra luchtbehandeling [9,10]. Dit staat haaks op de plannen die de EU presenteert in zijn Green Deal [11]. Hierin wordt de industrie, ook de cleanroom-industrie, uitgedaagd om te innoveren en bij te dragen aan een groene economie.

De onlangs uitgebrachte ISO 14644-16 geeft aanbevelingen voor energiebesparende methoden en optimalisatietechnieken in elke fase van de levenscyclus van een cleanroom [12]. Vraaggestuurde filtratie (Demand Controlled Filtration [DCF]) is een van de oplossingen daarbij. Dit houdt in dat een cleanroom tijdens niet-operationele uren met minder ventilatie kan functioneren. [13] laat zien dat dit voor cleanrooms in de praktijk een grote besparing, tot meer dan 90%, in de ventilatorenergie kan opleveren. [14] laat zien dat wanneer je in die periode het debiet en de drukhiërarchie aanpast, zelfs tot een extreme waarde van 0 m³/h en 0 Pa, dit niet ten koste hoeft te gaan van de luchtkwaliteitsprestaties van de cleanroom.

Naast de luchtverversing, spelen de binnenklimaatcondities vaak ook een rol. Echter, de strakke en beperkte

bandbreedtes die worden gehanteerd voor de temperatuur en de RV zijn niet altijd noodzakelijk voor de processen die plaatsvinden in de cleanroom en ook niet voor het thermisch comfort van de personen in de cleanroom. ISO 14644-16 beveelt aan om, daar waar mogelijk, de temperatuur in de cleanroom te variëren binnen het comfortniveau en de RV vrij te laten tussen 30% en 70%. Niet alleen de comfortcondities kunnen worden aangepast, ook een reductie van warmtebronnen in een cleanroom vermindert de koelbehoefte. Typische warmtelasten van het totaal aan apparatuur in een cleanroom liggen tussen de 50- 150 W/m² en zijn daarmee de belangrijkste warmtebron in een cleanroom [15,16].

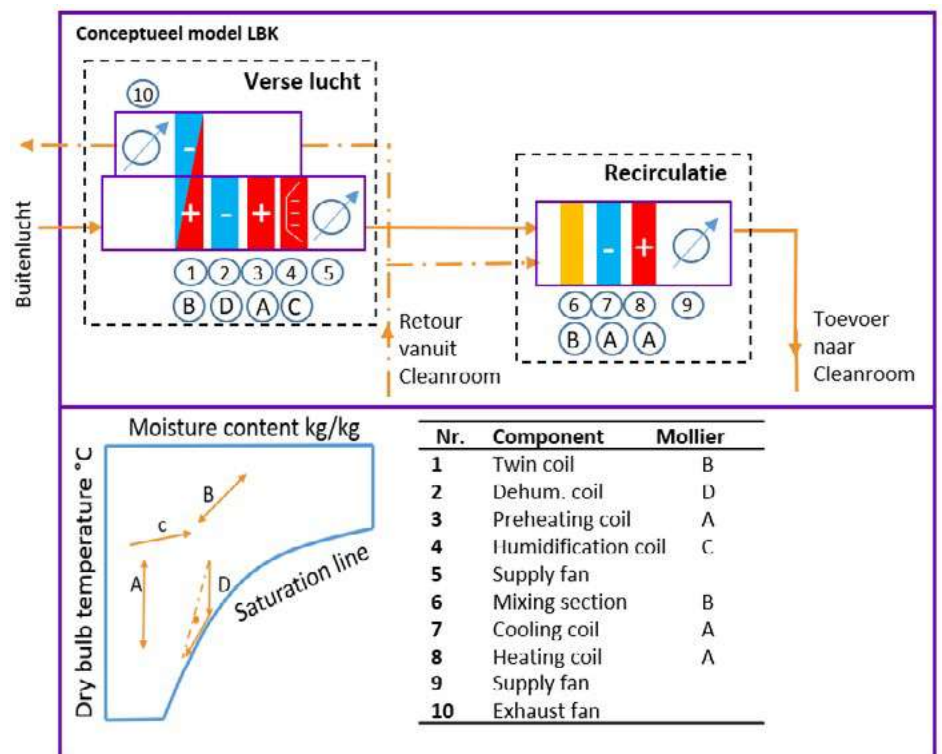
Tot slot wordt het energiegebruik voor de conditionering van een cleanroom ook bepaald door het buitenklimaat. Meer specifiek de condities van de verse buitenlucht en de mogelijkheid voor bijvoorbeeld vrije koeling, danwel noodzaak tot conditionering. Hoewel in een cleanroom recirculatie een groot aandeel heeft in de totale ACR, vormt de conditionering van het ventilatiedeel, het verse luchtdeel, met 30—65% [17], een belangrijke post in de totale energievraag.

Uit de eerdergenoemde studies [13,14] is naar voren gekomen dat DCF een goede techniek is om het energiegebruik in een cleanroom te reduceren, zonder dat dit de luchtkwaliteitsprestaties van de cleanroom beïnvloedt. In die studies is echter enkel de focus geweest op de ventilatorenergie. Onduidelijk is hoe DCF ook kan bijdragen in het reduceren van de totale energievraag van een cleanroom. In het hier beschreven onderzoek wordt daar op ingegaan. Op basis van een simulatiestudie is de totale energievraag onderzocht die nodig is voor het conditioneren van de lucht van een cleanroom. Via een parameterstudie is geprobeerd om aanbevelingen af te leiden voor een optimalisering (minimalisatie) van de energievraag van cleanrooms, onder andere bij toepassing van DCF.



Figuur 1: Impressie van een cleanroom.

Figuur 2: Conceptueel model van de luchtbehandeling zoals dat is gemodelleerd.



Methode

Model: Omdat onderzoek naar de totale energievraag, en met name het effect van het aanpassen van parameters, in een daadwerkelijke cleanroom niet goed mogelijk is, is ervoor gekozen om de onderzoeksvraag te beantwoorden met gebruik van simulaties. Hiervoor is een model ontwikkeld op basis van empirische vergelijkingen en de massa- en energiebalans. Het model is opgebouwd uit drie elementen: de cleanroom, de luchtbehandeling en de buitencondities. Met het model kunnen vervolgens

uitspraken gedaan worden over het jaarlijkse energiegebruik. De drie onafhankelijke variabelen die worden meegenomen in het model zijn de massastroom [kg/s], de luchttemperatuur [°C] en het absolute vochtgehalte in de lucht [kg/kg]. Het model zelf is ontwikkeld in MATLAB-Simulink (R2015b).

De details van de modelering van de afzonderlijke componenten zijn terug te vinden in [2]. Figuur 2 geeft een overzicht van het model van de luchtbehandeling en de individuele componenten daarin. Alle componenten die ten behoeve van het model zijn ontwikkeld zijn geverifieerd. Eerst steady-state, via handberekeningen, daarnaast heeft er een validatie plaatsgevonden die is gebaseerd op een vergelijking met gemeten gegevens in een bestaande GMP klasse C faciliteit in Eindhoven. Uit deze validatie kon worden geconcludeerd dat het model in staat is om een vergelijkbare retourtemperatuur en luchtvochtigheidsratio te berekenen zoals is gemeten voor de onderzochte periode. Dit onder verwaarlozing van het effect van onverwachte verstoringen in de meetdata. De verschillen in de temperatuur zijn kleiner dan de onnauwkeurigheid van de gebruikte sensoren (0,5°C). De warmtelast die in het model is aangenomen (47,5 W/m²) komt overeen met wat voor een farmaceutische cleanroomfaciliteit verwacht zou mogen worden [16].

Onderzoeksvarianten: Met het beschikbare model zijn vervolgens verschillende varianten onderzocht om een uitspraak te kunnen doen over de energievraag en het effect van verschillende parameters daarop. In Tabel 1 is de informatie voor de referentiesituatie (basisvariant) samengevat. Deze referentiesituatie is afgeleid van een bestaande GMP grade C faciliteit. De

Referentie cleanroom		
Oppervlak	20	m²
Hoogte	3	m
Interne warmtelast		
Warmtelast machines	50	W/m²
Voelbare warmtelast gebruikers	100	W
Latente warmtelast gebruikers	40	W
Vocht productie gebruikers	63,8	g/h
Cleanroom set points		
Circulatievoud	20	h⁻¹
Luchttemperatuur	20 ± 2	°C
Relatieve vochtigheid	50 ± 5	%

Tabel 1: Parameters voor de basisvariant van de cleanroom.

berekeningen zijn voor een situatie waarbij conditionering van een typisch volume voor één persoon plaatsvindt [5x4x3m (LxBxH)]. Voor de weergegevens zijn de data van Schiphol gebruikt, in dit geval voor het jaar 2004. 25% van de totale lucht is verse lucht die wordt voorbehandeld.

Deze wordt geconditioneerd tot de gewenste vochtigheidsgraad en minimumtemperatuur en vervolgens gemengd met gerecirculeerde lucht uit de cleanroom in een verhouding 1:3. Deze gemengde lucht wordt vervolgens geconditioneerd naar de gewenste waarde (setpoint). De cleanroom heeft een continue ACR van 20 h⁻¹ en er wordt een overdruk gehandhaafd. Aangenomen wordt dat 10% van de aangevoerde lucht verloren gaat door ongecontroleerde exfiltratie, de overige 90% wordt mechanisch afgezogen. Dit wordt deels afgevoerd en deels weer gerecirculeerd. De cleanroom is operationeel van maandag tot en met vrijdag van 08.00 tot 17.00 uur. Tijdens deze productie-uren is er een interne belasting van 50 W/m², daarbuiten niet.

Naast de basisvariant zijn er 17 cases onderzocht, waarbij is gevarieerd in de ACR (10/20 h⁻¹) en de toepassing van DCF (wel/niet – 0-20 h⁻¹), de luchtdichtheid van de cleanroom

(5/10% lekverlies), de interne warmtelast (0/50/150 W/m² – 0/50/100 W), de bandbreedte voor het RV-setpoint (5/20/50%) en de klimaatcondities (zee, land, mediterraan). Voor het klimaat is gebruik gemaakt van weerfiles van verschillende locaties in de wereld. Tabel 2 geeft een overzicht van alle onderzochte varianten.

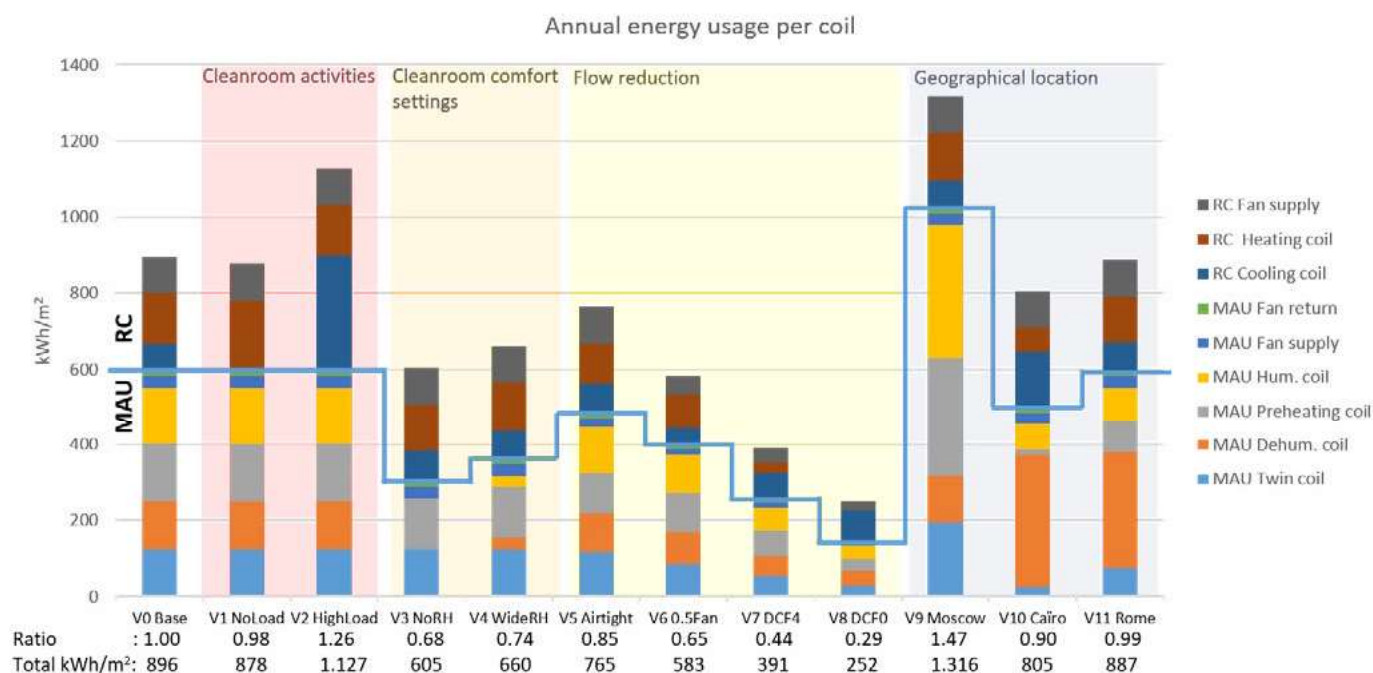
Resultatenweergave: De simulaties leveren informatie over zowel de energievraag van het totale luchtbehandelingssysteem (LBK) als die van de afzonderlijke componenten. Het vermogen per LBK-component, de temperatuur in de cleanroom en de RV zijn als functie van de tijd beschikbaar. Uit deze gegevens is de jaarlijkse energievraag in de ruimte [kWh/m²] per LBK-component afgeleid. Dit geeft niet alleen inzicht in het totale energieverbruik per variant, maar toont ook de verhouding tussen de afzonderlijke componenten binnen een variant en de verhouding tussen de onderlinge componenten voor verschillende varianten.

Resultaten

In Figuur 3 wordt de jaarlijkse energievraag samengevat [kWh/m²] zoals berekend voor de verschillende varianten (cleanroom activiteit, comfort, debiet, geografie). In de figuur wordt ook een onderscheid gemaakt voor het verse luchtdeel (ventilatie) en het recirculatie-deel. De 'Ratio' geeft de verhouding weer van de energievraag van de betreffende variant

Tabel 2: Overzicht van de gemodelleerde varianten en de variatie in parameterinstellingen. De vetgedrukte, onderstreepte cel is de gewijzigde parameter ten opzichte van het basisscenario. ACR 1 [h⁻¹] is wanneer de cleanroom operationeel is, ACR 2 [h⁻¹] is tijdens de niet-operationele uren. De locatie van het basisscenario is Schiphol (AMS (NL)), andere locaties zijn Moskou (MOW (RU)), Cairo (CAI (EG)) en Rome (ROM (IT)).

	Variant	Ventilatie			Interne warmtelast			Set points ruimte	
		ACR 1	ACR 2	luchtdichtheid	apparatuur	persoon	temp	RV	locatie
		[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	% lost	[W/m ²]	[W]	[°C]	[%]	
Basis	V0 _{Base}	20	20	10	50	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
Activiteiten	V1 _{NoLoad}	20	20	10	0	0	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
	V2 _{HighLoad}	20	20	10	150	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
Comfort	V3 _{NoRH}	20	20	10	50	100	20 ± 2	50 ± 50	AMS (NL)
	V4 _{WideRH}	20	20	10	50	100	20 ± 2	50 ± 20	AMS (NL)
Debiet	V5 _{Airtight}	20	20	5	50	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
	V6 _{LowFan}	10	10	10	50	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
	V7 _{DCF4}	20	4	10	50	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
	V8 _{DCF0}	20	0	10	50	100	20 ± 2	50 ± 5	AMS (NL)
Klimaat	V9 _{Mow}	20	20	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	MOW (RU)
	V10 _{Cal}	20	20	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	CAI (EG)
	V11 _{Rom}	20	20	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	ROM (IT)
Klimaat + DCF	V12 _{Mow_DCF4}	20	4	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	MOW (RU)
	V13 _{Mow_DCF0}	20	0	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	MOW (RU)
	V14 _{Cal_DCF4}	20	4	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	CAI (EG)
	V15 _{Cal_DCF0}	20	0	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	CAI (EG)
	V16 _{Rom_DCF4}	20	4	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	ROM (IT)
	V17 _{Rom_DCF0}	20	0	10	50	50	20 ± 2	50 ± 5	ROM (IT)



Figuur 3: Jaarlijkse energievraag, totaal en per component van de LBK [kWh/m^2] voor de gesimuleerde varianten. De blauwe lijn scheidt het verse lucht deel en de recirculatie. De Ratio vergelijkt de vraag met die van de basis case.

ten opzichte van de basisvariant. Ter illustratie, de basisvariant (V0Base) heeft een jaarlijkse energievraag van bijna 896 kWh/m^2 . Alle componenten hebben een vergelijkbare bijdrage, met uitzondering van de drie ventilatoren. De luchtbehandeling voor het recirculatiedeel vraagt 34% van de totale energie, hoewel deze alle lucht conditioneert die naar de cleanroom gaat. De luchtbehandeling voor het verse luchtdeel vraagt 66% van de totale energie terwijl deze slechts 25% van de totale toevoerlucht conditioneert. Per definitie is de Ratio voor de basisvariant 1.0.

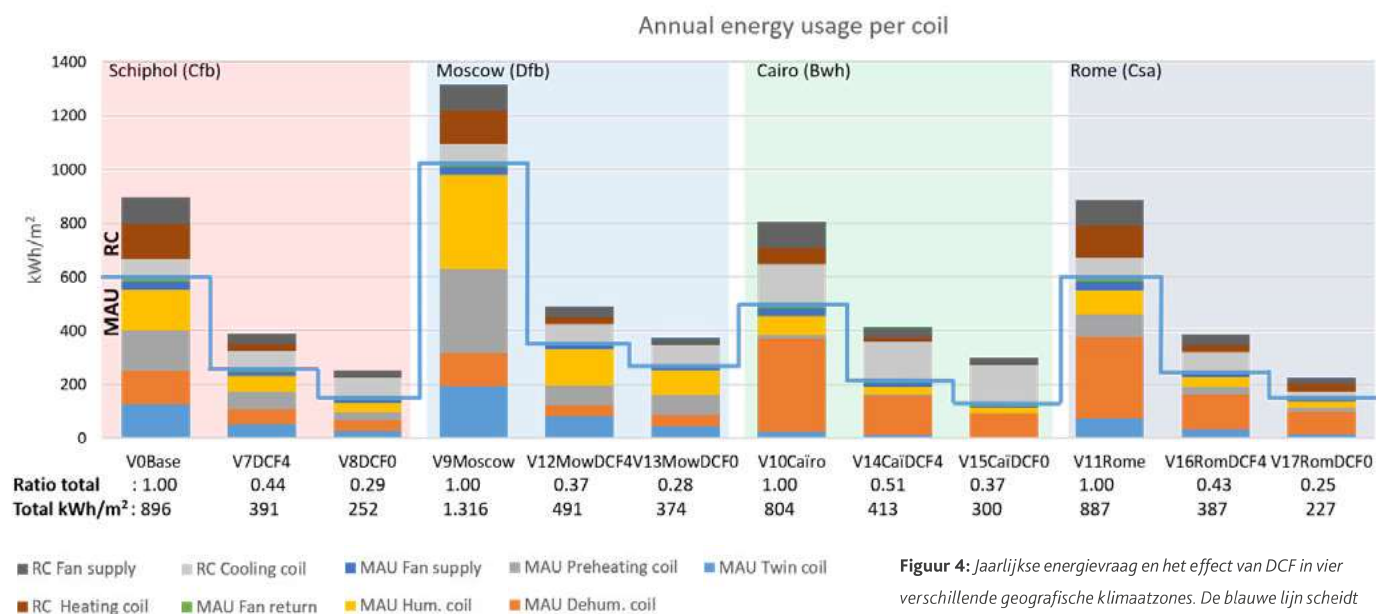
Figuur 4 zoomt nog wat verder in op de geografische varianten (klimaat) waarbij het effect van toepassing van DCF zichtbaar is (variant 12–17). Deze resultaten worden op een vergelijkbare manier gepresenteerd als in Figuur 3.

Discussie

De energievraag voor de basisvariant (896 kWh/m^2) is bijna 18 keer hoger dan de maximale energiebehoefte die tegenwoordig geldt voor nieuwe utiliteitsgebouwen (voor verwarming, koeling én verlichting - 50 kWh/m^2 per jaar [18]). Daarmee is duidelijk dat het conditioneren van een cleanroom inderdaad een energie-intensieve activiteit is. Hieronder zullen per onderdeel kort de effecten van de varianten hierop besproken worden.

Cleanroom activiteiten: De varianten V1NoLoad en V2HighLoad vertonen een vergelijkbare energievraag voor het verse luchtdeel. Dit is te verwachten, aangezien het enige verschil een verandering is in de interne warmtelast in de cleanroom. Dit resulteert in verschillen in de verwarming- en koelvraag van de recirculatie-unit. Bij het ontbreken van een interne warmtelast is logischerwijs geen sprake meer van een koelvraag, maar zal ook extra verwarming nodig zijn om de gewenste temperatuur te bereiken. Daardoor blijft de totale energievraag vergelijkbaar met het basisscenario. Een hogere interne warmtelast (V2HighLoad; factor 3) resulteert voor de onderzochte case in een vier keer hogere koelvraag. De resultaten laten zien dat het effect van de interne warmtelast in de cleanroom op de energievraag van de luchtbehandeling beperkt blijft doordat effecten elkaar kunnen compenseren. Interessanter zijn de resultaten voor de andere varianten.

Cleanroom comfortinstellingen: Productkwaliteit en het comfort van het personeel in de cleanroom zijn belangrijke prestatie-eisen. Echter, vaak is het mogelijk iets ruimere marges aan te nemen zonder dat dit beide prestaties negatief beïnvloedt. Een extreme situatie, zonder RV-regeling (V3NoRH), laat zien dat dit een besparing van 32% oplevert ten opzichte van de energievraag voor de basisvariant. Waarschijnlijk is geen RV-regeling een stap te ver, maar een minder extreme variant (V4WideRH; RV: 30-70%) geeft nog altijd een besparing van 26% ten opzichte van de basisvariant. In beide gevallen wordt de winst gehaald in de conditionering van het verse lucht deel. Dit maakt ook duidelijk dat bevochtiging een energie-intensief proces is. De noodzaak ervan, of tenminste de instelwaarden, moeten goed overwogen worden en bij voorkeur een functie zijn van de processen die plaatsvinden in de cleanroom.



Figuur 4: Jaarlijkse energievraag en het effect van DCF in vier verschillende geografische klimaatzones. De blauwe lijn scheidt het verse lucht deel en de recirculatie. De Ratio vergelijkt de vraag met die van de basis case.

Debiëten: Een meer luchtdichte cleanroom vermindert de exfiltratieverliezen die ten minste moeten worden gecompenseerd met een verse luchttoevoer. In dit geval is ervoor gekozen om dat in het verse lucht debiet te verdisconteren. Het terugbrengen van de ongecontroleerde lucht lekkage van 10% naar 5% (V5Airtight) reduceert de totale energievraag naar 765 kWh/m² een besparing van 15%. Dit komt met name doordat minder verse lucht hoeft te worden geconditioneerd en ook in de recirculatie-LBK neemt in totaliteit de energievraag iets af.

Het verminderen van ACR van 20 h⁻¹ naar 10h⁻¹ (V60.5Fan) levert een totale besparing op van 35% ten opzichte van de basisvariant. De ventilatoren hebben een 50% lagere energievraag, terwijl op de luchtbehandeling tussen de 30-40% bespaard kan worden. Het is hierbij natuurlijk de vraag of de prestaties van de cleanroom dan in gevaar komen. Dat heeft alles te maken met de bronnen in een cleanroom. Helaas is de kennis hierover nog relatief beperkt, maar lijkt een overschatting van de bronproductie in de praktijk op te treden [19]. Als er minder sprake is van overdimensionering is energiebesparing een direct resultaat daarvan.

De toepassing van DCF, waarbij in rust (niet-operationele periode) met 4h⁻¹ (V7DCF4) of 0 h⁻¹ (V8DCF0) wordt geventileerd (25%)/gerecirculeerd (75%) laat zien dat ook op die manier grote besparingen mogelijk zijn. In [13] was al duidelijk dat een flinke besparing op de energievraag

van de ventilator mogelijk was. De hier gepresenteerde resultaten leveren het totale plaatje, inclusief de energie benodigd voor het conditioneren van de lucht. Bij teruggaan naar 4h⁻¹ kan een vraagreductie van 56% worden bereikt. In de extreme variant van 0h⁻¹ is dit zelfs 71%. In [14] is aangetoond dat dit de prestatie van de (farmaceutische) cleanroom tijdens de operationele fase niet hoeft te beïnvloeden. Dit is daarmee een oplossing die ingezet kan worden zonder dat hier veel aanpassingen nodig zijn, terwijl het een gelijkwaardige prestatie oplevert. Van de onderzochte varianten is DCF de meest effectieve oplossing om tot energiebesparingen te komen.

Om het effect van DCF op de energievraag nog wat verder te verduidelijken, is in Figuur 5 het cumulatieve verloop van de energievraag over een jaar weergegeven voor de basisvariant en voor de variant met DCF (4 h⁻¹). Merk op dat de y-as van de beide grafieken verschillend is. Het verloop van de energievraag voor de twee scenario's is redelijk vergelijkbaar. Maar de totale vraag is lager door het lagere debiet tijdens de niet-operationele uren. Twee componenten vallen op in de energievraag. De koelvraag in de recirculatie-unit wijkt nauwelijks af ten opzichte van de originele vraag. Dit laat zich verklaren door het feit dat koeling nagenoeg alleen nodig is tijdens de operationele uren en daardoor weinig verschilt ten opzichte van de basisvariant. De verwarmingsvraag in het verse luchtdeel kent een grotere procentuele besparing. Dit is het gevolg van het feit dat minder lucht hoeft te worden verwarmd op momenten (normaal gesproken de nacht) dat de temperatuurverschillen het grootst mogen worden geacht.

Klimaat: Het effect van het klimaat (via geografische locaties met een specifiek klimaat) maakt duidelijk dat de energievraag voor de conditionering van het verse luchtdeel hierdoor aanzienlijk wordt beïnvloed. Afhankelijk van het klimaat is er een grotere of gereduceerde energievraag

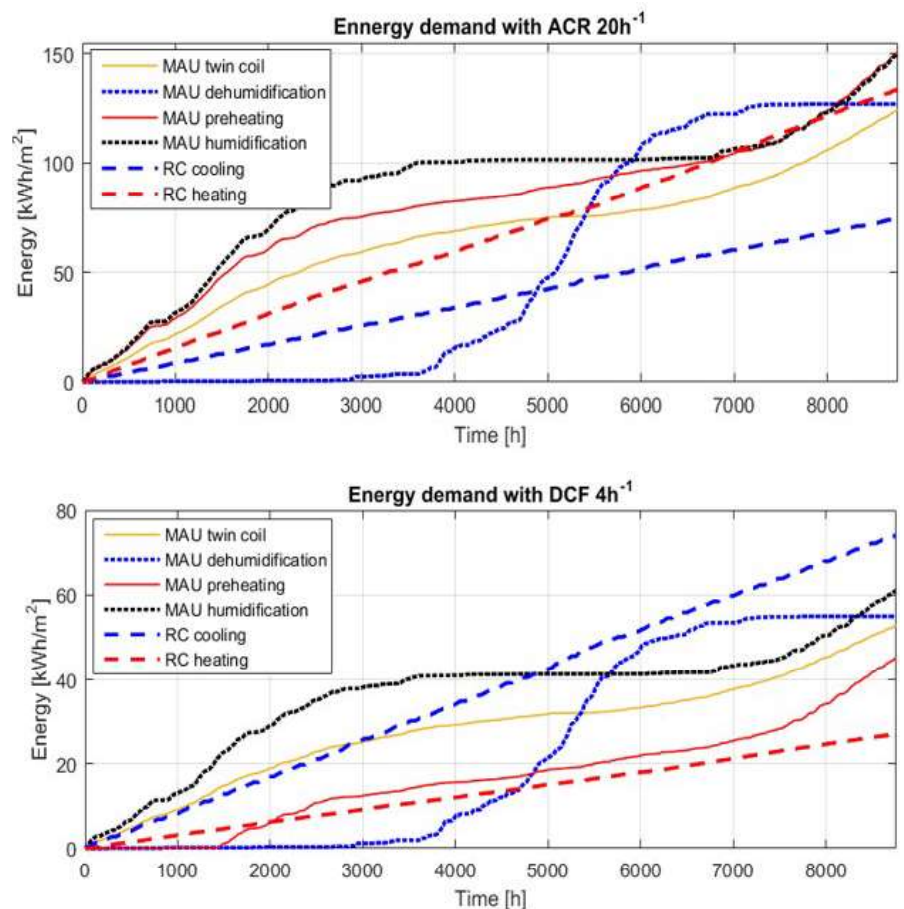
Figuur 5: Cumulatieve energievraag [kWh/m^2] voor een jaar voor het basisscenario (V0Base; boven) en bij toepassing van DCF met 4 h^{-1} (V7DCF4; onder). Let op de verschillende schalen op de y-as.

van de individuele componenten. Een opwarmend klimaat in Nederland betekent dus niet dat de totale energievraag van cleanrooms, zonder aanvullende maatregelen, aanzienlijk zal veranderen (lees minder worden).

Het lijkt logisch dat de onderzochte varianten een vergelijkbaar effect hebben op de energievraag wanneer deze op de verschillende klimaten worden toegepast. Figuur 4 laat, ter illustratie, het effect zien wanneer we DCF zouden toepassen. In alle gevallen zien we besparingen die in orde grootte vergelijkbaar zijn (zie 'Ratio total') en dus kunnen oplopen tot 50% of meer.

Overall: De simulatiestudies tonen de invloed aan van cleanroomactiviteiten, comfortinstellingen en debietreductie op basis van de aanbevelingen in ISO 14644-16 [12], maar ook de invloed van het klimaat op de energievraag van de cleanroom. Het hoogste energiebesparingspotentieel wordt berekend bij toepassing van DCF. Dit wordt dan ook als een eenvoudige en zeer effectieve maatregel gezien om de energievraag van cleanrooms te optimaliseren, ook voor reeds in bedrijf zijnde cleanrooms. Dit komt overeen met de conclusies van [20] en [13]. De kwaliteit van de cleanroom neemt hierdoor niet af zoals door [14] is aangetoond. Wel zal de cleanroom op DCF moeten worden ingericht. Denk onder andere aan een aanwezigheidssensor en een aanpassing van de regelingen.

Een combinatie van DCF met bijvoorbeeld minder strenge eisen aan de RV levert een aanvullende energiebesparing op. Geen controle op de RV lijkt niet wenselijk. Voor de onderzochte variant zien we dat situaties kunnen ontstaan waarbij $\text{RV} > 70\%$ (9% van de tijd) of $\text{RV} < 30\%$ (5% van de tijd). Beide kunnen leiden tot onwenselijke situaties



zoals schimmelgroei of fysiologisch en comfort ongemak voor de gebruikers van de cleanroom [21]. Een RV-bereik tussen 30%-70% is in lijn met de ISO 14644-16 [12] aanbeveling, en resulteert nog steeds in een aanzienlijk energiebesparingspotentieel. Maar RV is ook een belangrijke procesafhankelijke variabele. Bijvoorbeeld, blootgestelde poederproducten vereisen omgevingen met lage RV-waarden om absorptie van vocht te voorkomen. Een keuze voor een RV-regeling zal altijd als eerste hierop gebaseerd moeten worden. Echter, indien er mogelijkheden zijn om de toegestane range groter te maken, dan zou dat vanuit energiebesparing zeker overwogen moeten worden. Het gebruik van iets nauwkeurigere sensoren (T/RV) kan daarbij helpen doordat de bandbreedte minder extra hoeft te worden verkleind om binnen de eisen te blijven.

Voor de onderzochte varianten blijkt dat de energievraag om het verse luchtdeel voor te behandelen in het algemeen meer energie vraagt dan het recirculatiedeel (gemiddeld voor de varianten 61%). Dit terwijl in de berekeningen het aandeel verse lucht 25% bedraagt van de totale hoeveelheid. Op zich is dit niet verrassend. Maar dit besef vraagt wel om goed na te denken hoeveel verse luchttoevoer noodzakelijk is. De processen en het personeel (aantal) in de cleanroom zijn hierbij leidend.

Het inbrengen van een mindere hoeveelheid lucht is vanzelfsprekend interessant vanuit energiebesparingsoogpunt. Bij alle componenten van de LBK kan dan bespaard worden. In de variant V60.5Fan wordt deze gehalveerd. Zonder iets te veranderen in de cleanroom zelf, i.e. eenzelfde deeltjesproductie, zou dit

betekenen dat de stationaire concentratie in de cleanroom verdubbelt. In de praktijk blijken veel cleanrooms vaak overgedimensioneerd, en soms zodanig dat dit geen effect zou hebben op de kwaliteitsklasse van de cleanroom. Echter, dit kan niet zondermeer als uitgangspunt genomen worden. Mocht zo een maatregel in een bestaande cleanroom overwogen worden dan bieden metingen van de deeltjesconcentratie een manier om te leren wat de mogelijkheden zijn. Een relatieve eenvoudige mogelijkheid om de generatie van deeltjes te verminderen is om het kledingregime aan te passen [3]. Goede cleanroomkleding kan deze generatie met een factor 100 verminderen in vergelijking tot normale kleding [8]. In de ontwerpfase is het van belang om realistische inschattingen te maken van de te verwachten deeltjesproductie en op die manier het benodigde luchtdebiet daar beter op af te stemmen. Helaas ontbreekt het nog aan goede gegevens ten aanzien van deze deeltjesproductie en is het wellicht te overwegen om in het ontwerp ruimte te laten om deze in de praktijk te tunen. Daarmee wordt ook een cleanroom ontworpen die geoptimaliseerd kan worden wanneer deze toegepast gaat worden voor nieuwe of andere activiteiten. Vanuit het oogpunt van duurzaamheid in de breedte zou een dergelijk uitgangspunt ook toe te juichen zijn.

Conclusie

GMP-geclassificeerde cleanrooms hebben een tot 25 keer grotere energievraag dan een gemiddeld commercieel gebouw. De belangrijkste reden hiervoor is het hoge luchtverversingsvoldat de luchtkwaliteit van deze

ruimtes moet garanderen. Op basis van eigen onderzoek en aanbevelingen zoals genoemd door ISO 14644-16 (2019) is met behulp van simulaties voor een aantal varianten onderzocht hoe effectief deze de energievraag kunnen reduceren. Ook het effect op de vraag van de individuele componenten is hierbij beschikbaar. Varianten richten zich op de cleanroomactiviteiten, comfortinstellingen, het debiet en het klimaat.

De resultaten van deze simulaties tonen aan dat vraaggestuurde ventilatie (DCF) de grootste impact heeft op de jaarlijkse energievraag van de cleanroom. Dit is een techniek die in principe zowel toegepast kan worden op bestaande als nieuw te ontwerpen cleanrooms. De kwaliteit van het cleanroomproces (onderzocht voor farmaceutische cleanroom) wordt hierbij niet beïnvloed.

Aanvullende interessante maatregelen zijn een verruiming van de RV-bandbreedte, de hoeveelheid verse lucht en de totale luchtverversingshoeveelheid. Echter, dit zijn parameters die nauw verbonden zijn aan de processen die in de cleanroom plaatsvinden en de bezetting. De resultaten uit de studie laten wel zien dat het loont, energietechnisch, om hier bewust in het ontwerpproces over na te denken en mee te nemen in beslissingen over de benodigde luchthoeveelheden en de regeling.

Cleanrooms zijn een belangrijk onderdeel in heel veel hoogwaardige processen. De energievraag wordt daarbij vaak gezien als een tweede orde vraagstuk. Vanuit gezondheidsoogpunt heeft de kwaliteit van de cleanroom prioriteit. Echter, deze studie laat zien dat energiebesparing in cleanrooms relatief eenvoudig mogelijk is zonder dat aan die kwaliteit hoeft te worden ingeboet. Vanuit het oogpunt van een duurzame samenleving en gezien het feit dat de vraag naar en het gebruik van cleanrooms de komende jaren naar verwachting nog zal toenemen zou het goed zijn wanneer deze kennis ingezet wordt.

Referenties

1. P. Molenaar, Ventilation efficiency improvement in pharmaceutical cleanrooms for energy demand reduction, Eindhoven, 2017. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/ventilation-efficiency-improvement-in-pharmaceutical-cleanrooms-f>.
2. B. Ludlage, Optimizing energy demand during the non-operational hours in a cleanroom, Master thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2019.
3. A. Fedotov, Saving energy in cleanrooms, Cleanroom Technol. 22 (2014) 14–18. https://www.cleanroomtechnology.com/technical/article_page/Saving_energy_in_cleanrooms/100623.
4. European Commission, The Rules Governing Medicinal Products in the European Union Volume 4 EU Guidelines to Good Manufacturing Practice Medicinal Products for Human and Veterinary Use Annex 1 Manufacture of Sterile Medicinal Products (corrected version), Brussel, Belgium, 2008.
5. NEN, NEN-EN-ISO 14644-1 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration, 2016.
6. W. Whyte, K. Agricola, M. Derks, 4 Clean Air and Containment Review | Issue 25, 2016. www.cleanairandcontainment.com (accessed December 2, 2019).
7. N. Lenegat, Making best use of HVAC systems, (2011). https://www.cleanroomtechnology.com/news/article_page/Making_best_use_of_HVAC_systems/58842 (accessed December 2, 2019).
8. ISPE, Baseline guide: Volume 3 Sterile product manufacturing facilities, 2011. <https://ispe.org/publications/guidance-documents/sterile-product-manufacturing-facilities-third-edition>.
9. C.Y. Khoo, C.C. Lee, S.C. Hu, An experimental study on the influences of air change rate and free area ratio of raised-floor on cleanroom particle concentrations, Build. Environ. 48 (2012) 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.001>.
10. A. Bhatia, PDHonline Course M143 (4 PDH) A Basic Design Guide for Clean Room Applications, (n.d.). www.PDHcenter.com (accessed December 2, 2019).
11. E. Commission, The European Green Deal, (2020). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=NL>.
12. ISO, ISO 14644-16 Cleanrooms and associated controlled environments, Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
13. M.G.L.C. Loomans, P.C.A. Molenaar, H.S.M. Kort, P.H.J. Joosten, Energy demand reduction in pharmaceutical cleanrooms through optimization of ventilation, Energy Build. 202 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109346>.
14. M.G.L.C. Loomans, T.B.J. Ludlage, H. van den Oever, P.C.A. Molenaar, H.S.M. Kort, P.H.J. Joosten, Experimental investigation into cleanroom contamination build-up when applying reduced ventilation and pressure hierarchy conditions as part of demand controlled filtration, Build. Environ. 176 (2020) 106861. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106861>.
15. A. McCann, Energy Efficiency in Laboratory Buildings, University of Strathclyde, Glasgow, 2005.
16. P. Morgenstern, M. Li, R. Raslan, P. Ruysssevelt, A. Wright, Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on departmental consumption intensities?, Energy Build. 118 (2016) 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.052>.
17. J.M. Tsao, S.C. Hu, T. Xu, D.Y.L. Chan, Capturing energy-saving opportunities in make-up air systems for cleanrooms of high-technology fabrication plant in subtropical climate, Energy Build. 42 (2010) 2005–2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.009>.
18. Energie Vastgoed, Benchmark Energieverbruik, (2021). <https://www.energievastgoed.nl/benchmarktool/> (accessed March 17, 2021).
19. O.T. Ogunsola, J. Wang, L. Song, ASHRAE Research Project Report 1399-RP: Survey of particle production rates from process activities in pharmaceutical and biological cleanrooms, Oklahoma, 2018.
20. G. Meaney, Weekend Shutdown of Validated AH Systems | Hvac | Technology, (2011) 4. <https://www.scribd.com/doc/137722099/Weekend-Shutdown-of-Validated-AH-Systems> (accessed December 2, 2019).
21. M. Loomans, C.W.J. Cox, Grenzen voor de relatieve vochtigheid van het binnenklimaat: een beoordeling op basis van een literatuurstudie., TVVL Mag. 6 (2002) 28–34. <https://research.tue.nl/en/publications/boundaries-for-the-relative-humidity-in-the-indoor-environment-an> (accessed September 4, 2019).