

Ventilatie-effectiviteit bij mechanische balansventilatie

In woningen wordt steeds vaker een balansventilatie met warmteterugwinning wordt toegepast. Met de inbreng van dergelijke systemen wordt in het algemeen impliciet verondersteld dat de ventilatie-efficiëntie voldoende is en vergelijkbaar met een goed gemengde situatie. Hoewel dit is onderzocht en in orde blijkt te zijn voor kleinere ruimtes met een eenvoudige geometrie, bijvoorbeeld een slaapkamer, is dit voor een grotere, meer complexe geometrie nog onduidelijk. Deze studie onderzoekt de ventilatie-efficiëntie van gebalanceerde ventilatiesystemen in L-vormige geometrieën, die representatief zijn voor typische woonkamer/keuken-combinaties in woningen in Nederland. De Computational Fluid Dynamics techniek is gebruikt om het effect van verschillende parameters op de ventilatie-effectiviteit in een L-vormige ruimte te onderzoeken. De resultaten geven aan dat, uitgaande van de huidige praktijkuitvoering, ook voor grotere ruimtes in woningen met balansventilatie een gemengde situatie wordt benaderd. De keuze voor een specifiek toevoerventiel resulteert wel in een meer robuuste oplossing.

D. (Dirk) Dijkstra, dr.ir. M. (Marcel) G.L.C. Loomans, prof.dr.ir. J. (Jan) L.M. Hensen, Technische Universiteit Eindhoven, Department of the Built Environment, Unit BPS; B. E. (Bart) Cremers, Zehnder Group, Zwolle

De intentie om het energiegebruik in gebouwen te verminderen heeft ertoe geleid dat in woningen, naast een duidelijk verbeterde isolatie van de schil, steeds vaker een balansventilatiesysteem met warmteterugwinning wordt toegepast. Met de inbreng van dergelijke systemen wordt in het algemeen impliciet verondersteld dat de ventilatie efficiëntie voldoende is en vergelijkbaar aan een goed gemengde situatie. Dit is onderzocht en blijkt

bij benadering reëel voor kleinere ruimtes met een eenvoudige geometrie, bijvoorbeeld een slaapkamer [1]. Het is echter nog niet consequent onderzocht voor wat grotere ruimtes met een meer complexe geometrie, bijvoorbeeld een woonkamer met een open keuken. De beperkt beschikbare richtlijnen adviseren een minimale afstand tussen de ventielen en muren, evenals de plaatsing van ventielen ten opzichte van de woonkamer. Maar de onder-

bouwning daarvoor is zeer beperkt en er is geen informatie beschikbaar over hoe om te gaan met meer complexe geometrieën zoals nissen (ISSO, 2010). Vragen uit de praktijk geven daarnaast aan dat het momenteel onduidelijk is wat de invloed van de ruimtegeometrie op de ventilatie effectiviteit is.

Het meeste onderzoek ten aanzien van gebalanceerde mechanisch geventileerde ruimtes is gedaan met behulp van eenvoudige ruimte-

vormen [2; 3]. De ruimtelijke inrichting van een kamer met meubels kan ook van invloed zijn op de luchtstroming [4]. In deze studie wordt de (lokale) ventilatie effectiviteit van gebalanceerde ventilatiesystemen onderzocht wanneer deze systemen in grotere, meer complexe geometrieën worden toegepast. Naast ventilatie efficiëntie worden ook de efficiëntie van warmteafvoer en de kans op tochtklachten onderzocht voor de verschillende varianten. Voor dit onderzoek wordt een enkele L-vormige geometrie toegepast die representatief wordt verondersteld voor een typische woonkamer met open keuken. Het onderzoek richt zich op het gebruik van verschillende ventielontwerpen, de plaatsingen ervan, verwarming- en koelsituaties, en het effect van zonlicht.

METHODE

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van numerieke stromingssimulaties met behulp van de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek [5]. In de voorbereiding daartoe is het onderzoek in vier delen opgesplitst. Ten behoeve van een beperkte validatie is gebruik gemaakt van de meetstudie zoals beschreven door de Coo [6]. Dit betrof een klimaatkamer studie naar de ventilatie efficiëntie. Hiervan is een CFD-model ontwikkeld dat de luchtstroom en de gemiddelde leeftijd van de lucht in de onderzochte ruimte simuleert. Vervolgens is gedetailleerd aandacht besteed aan de vereiste randvoorwaarden voor de modelering van de luchttoevoer. Zowel ventielen met een radiale als axiale werp (verder aangeduid als 'radiaal ventiel' en 'axiaal ventiel') zijn langs meettechnische weg onderzocht om de karakteristieken ervan meer nauwkeurig te kunnen bepalen voor een correcte modelering. Figuur 1 geeft een voorbeeld van de meting van het profiel van de toevoersnelheid van een ventiel zoals is toegepast. Deze informatie is uiteindelijk gebruikt om de betreffende ventielen in een



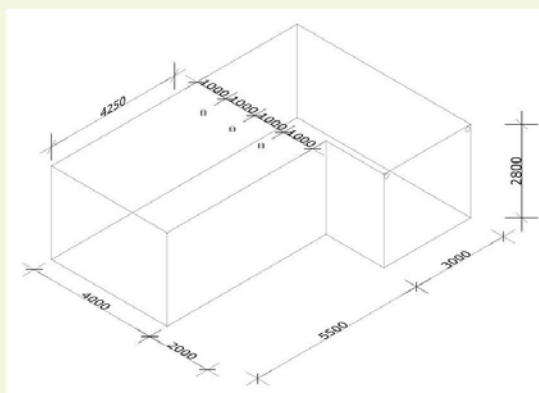
-Figuur 1- Meetopstelling voor het meten van het snelheidsprofiel van een van de onderzochte toevoerventielen (axiaal)

CFD-model te kunnen implementeren. Door de verschillen tussen de onderzochte ventielen was een verschillende aanpak gewenst. Voor het axiale ventiel is gebruik gemaakt van de zogenaamde box-methode, het radiale ventiel kon met de vereenvoudigde methode goed beschreven worden. De gebruikte methodes voor de modelering van de ventielen zijn gevalideerd aan de hand van controlemetingen op enige afstand van het ventiel. Ook in dit geval is de betreffende meetruimte hiertoe in CFD gesimuleerd [7].

Na validatie van het CFD-model voor de meest belangrijk geachte prestatie indicator voor het bepalen van de ventilatie efficiëntie en de modelering van de complexe randvoorwaarden van de toevoerventielen is een

referentiemodel (basis variant) geformuleerd van waaruit verschillende parameters zijn onderzocht. Figuur 2 geeft de geometrie van de basisvariant zoals die is gebruikt weer. In dit geval is een L-vormige ruimte onderzocht. Dit wordt representatief verondersteld voor de L-vormige woonkamer die typisch in Nederlandse doorzonwoningen gevonden kan worden. De gemiddelde grootte van deze kamer is 8,5x6x2,8 meter [8] en deze is ook in dit geval toegepast. Toevoer ventielen zijn op gelijke afstand geplaatst in de kern van de ruimte, zoals geadviseerd door de fabrikant. De afstand tussen de toevoerventielen en de muren is 1 meter. Het basisscenario is gemodelleerd met axiale toevoer ventielen. De afzuigventielen worden geplaatst in het uiteinde van de L-vorm. In werkelijkheid worden de afzuigventielen waarschijnlijk ook in deze hoek gepositioneerd vanwege de locatie van de keuken. Het basismodel is isotherm. De vier overige varianten die zijn onderzocht variëren in thermische omstandigheden, het type ventiel en plaatsing van het ventiel bij een gelijkblijvende geometrie (figuur 3). De variant 'gevelzijdig' wordt gebruikt om de invloed van de ventiel posities te onderzoeken. De variant 'radiale ventielen' wordt gebruikt om het effect van de richting van de werp te vergelijken. De variant 'zonverwarmd' onderzoekt het effect van zonnestraling op de vloer op de ventilatie-efficiëntie. Een oppervlak in de kamer die door de zon beschenen wordt levert een warmtestroom in de kamer. De variant 'verwarmen/koelen' wordt gebruikt om te onderzoeken hoe de ventilatie-efficiëntie wordt beïnvloed wanneer er verwarmd of gekoeld wordt via de ingeblazen lucht. De gebruikte temperaturen komen overeen met de binnentemperatuur in de tussenseizoenen, waarbij vaak slechts weinig verwarming of koeling nodig is. Deze variant is met zowel axiale als radiale ventielen doorgerekend.

Figuur 2- Gehanteerde geometrie voor de parameterstudie (afmeting in mm)



-Figuur 3- Overzicht van de onderzochte varianten inclusief een kort toelichting op de belangrijkste karakteristieken

Variant basis	Variant gevelzijdig	Variant radiale ventielen	Variant zonverwarmd	Variant verwarmen/koelen
<p>○ ○ ○ Axiale ventielen</p>	<p>Axiale ventielen ○ ○ ○</p>	<p>○ ○ ○ Radiale ventielen</p>	<p>10W/m² ○ ○ ○ Axiale ventielen</p>	<p>Axiale Ventielen +/- °C</p>
<p>- Kernzijdig - Axiale ventielen - Isotherm</p>	<p>- Ventielen 1m van de gevel geplaatst - Axiale ventielen - Isotherm</p>	<p>- Kernzijdig - Radiale ventielen - Isotherm</p>	<p>- Kernzijdig - Axiale ventielen - Inblaas 19°C - Plaatselijk warmte stroom 10 W/m² over 6,8 m² - Wanden adiabatisch</p>	<p>- Kernzijdig - Axiale/radiale ventielen - Koelen: inblaas 17°C, wanden 21°C, vloer 21°C - Verwarmen: inblaas 21°C, wanden 19°C, vloer 20°C.</p>

De varianten zijn vergeleken op verschillende prestatie-indicatoren, onder andere de Local Air Change Index (LACI), efficiëntie warmteafvoer en de luchtsnelheid (tocht). De Local Air Change Index (LACI) is een maat voor de ventilatie efficiëntie in een (eindig) klein volume p in de ruimte [9]. De LACI varieert in een ruimte. Zij kan hoog zijn (>>100%) voor posities in de buurt van de toevoer en laag (<<100%) in onvoldoende geventileerde delen van de ruimte. Wanneer de zone air distribution effectiveness [10] als referentie wordt genomen voor de minimum vereiste waarde, moet de LACI tenminste >80% zijn in verwarmde ruimten en >100% in gekoelde ruimten. Tochtklachten kunnen worden ingeschat met behulp van de draft rate (DR) [11]. Deze indicator geeft het gemiddelde percentage klagende weer ten gevolge tocht. In het kader wordt een verdere toelichting gegeven op de bepaling van deze indicatoren.

Het model is ruimtelijk gediscretiseerd met behulp van een combinatie van een gestructureerd en ongestructureerd grid. Voor het CFD-model van de basis variant is een gridstudie uitgevoerd. De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met behulp van het unsteady RNG k-ε turbulentiemodel [12] in combinatie met enhanced wall treatment. Het grid nabij de wanden is hierop zo goed als mogelijk aangepast (maximum y+-waarde 5,5 rond het impact punt van de jet op de vloer en wand,

voor de overige delen y+-waarde tussen 1 en 4). Voor de niet-isotherme simulaties wordt aanvullend de energievergelijking opgelost, waarbij de Boussinesq benadering is toegepast. De berekening van de gemiddelde luchtleeftijd vindt in een nabewerkingsstap plaats. Alle berekeningen zijn uitgevoerd met tweede orde discretisatie.

De berekening van het luchtstromingsprobleem zelf vindt in twee stappen plaats. Eerst wordt een oplossing berekend met een stationaire simulatie. Vervolgens worden een instationaire simulatie uitgevoerd om een betere convergentie van het stromingsprobleem te krijgen. Naast de residuen worden monitorpunten (14 in totaal) in het stromingsprobleem gebruikt om het verloop van de snelheid op verschillende punten in de ruimte gedurende het oplosproces te controleren. Na een (virtuele) simulatietijd van 30 minuten wordt een gemiddeld constante waarde bereikt. De standaard deviatie in de berekende snelheid blijft in het algemeen kleiner dan 0.01 m/s. De monitorpunten worden ook gebruikt om op vaste punten een vergelijk te kunnen maken tussen de varianten. De punten zijn derhalve gedefinieerd op belangrijk geachte punten in de leefzone van de kamer.

RESULTATEN EN DISCUSSIE

Figuur 4 toont het resultaat voor de LACI voor de vijf varianten. In de vergelijking tussen de

De local air change index wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de nominale tijdconstante en de lokale gemiddelde leeftijd van lucht in een klein volume van de ruimte. De nominale tijdconstante is de tijd waarin een hoeveelheid lucht gelijk aan het volume van de ruimte wordt toegevoerd aan de ruimte. Vergelijking 1 beschrijft de local air change index ϵ_p^a . In een situatie met volledige menging komt de lokale gemiddelde leeftijd van lucht overeen met de nominale tijdconstante. De local air change index is dan 100%. Vergelijking 2 beschrijft de warmteafvoer efficiëntie ϵ_t als variant hierop.

$$\epsilon_p^a = \tau_n / \bar{\tau}_p \cdot 100\% \quad [\text{vergelijking 1}]$$

waarbij ϵ_p^a = Local air change index (%), τ_n = Nominale tijdconstante (s), $\bar{\tau}_p$ = Gemiddelde luchtleeftijd in een klein volume in de ruimte (s).

$$\epsilon_t = \left(\frac{T_e - T_s}{T_p - T_s} \right) \cdot 1 \quad [\text{vergelijking 2}]$$

waarbij ϵ_t = warmteafvoer efficiëntie (%), T_e = afvoertemperatuur (°C), T_s = toevoertemperatuur (°C), T_p = temperatuur op een punt in de ruimte (°C).

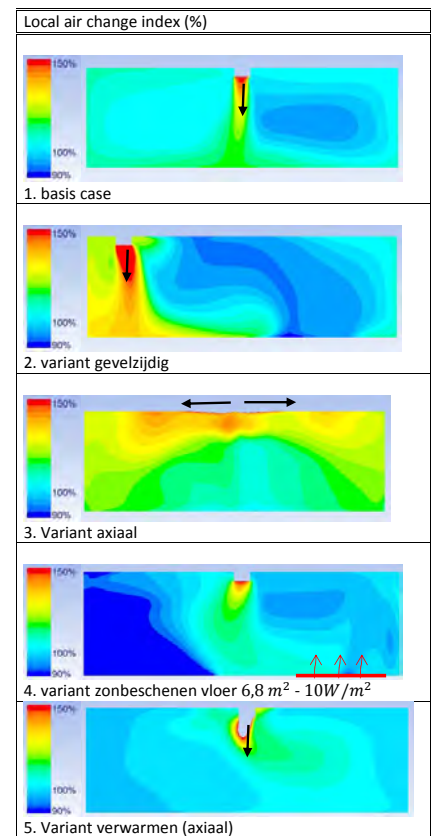
Middels vergelijking 3 wordt een inschatting gemaakt hoe groot de kans op tochtklachten is op een bepaald punt. In de vergelijking wordt de kans op tochtklachten DR (Draft Rate) in relatie gebracht met de temperatuur van de luchtstroom, de luchtsnelheid en de turbulentie intensiteit van de luchtstroom.

$$DR(\%) = [(32 - T_p) \cdot (v - 0,05)^{0,62}] \cdot (0,37 \cdot v \cdot T_u + 3,14) \quad [\text{vergelijking 3}]$$

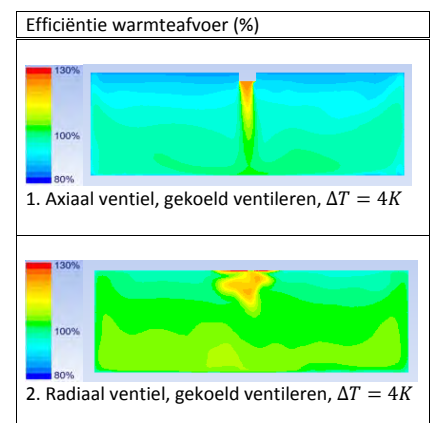
waarbij DR = kans op tochtklachten (%), T_p = temperatuur op een punt in de ruimte (°C), v = gemiddelde luchtsnelheid op een punt in de ruimte (m/s), T_u = turbulentie intensiteit op een punt in de ruimte (%).

DR kan in principe worden bepaald op een willekeurig punt (klein volume) in de ruimte. De afleiding van DR is echter gebaseerd op metingen met proefpersonen waarbij de perceptie van tocht op hoofd niveau leidraad is geweest.

basis variant en de variant gevelzijdig (Figuur 4.1 en 4.2) heeft de worp van de ventielen de grootste invloed op zowel de LACI en de snelheid (niet getoond). Buiten de worp zijn de snelheden laag en de LACI is tussen 90% en 110% voor beide varianten. Een gemengde situatie mag in dat geval verondersteld worden. Binnen het gebied van de worp van beide varianten worden hoge snelheden gesimuleerd, en is de LACI ruim boven de 100%.



-Figuur 4- Local air change index in een doorsnede (in de lengterichting door het centrale ventiel) van de onderzochte ruimte voor de verschillende varianten



-Figuur 5- Efficiëntie warmteafvoer in een doorsnede (in de lengterichting door het centrale ventiel) van de onderzochte ruimte voor de twee typen ventielen

Op basis van deze vergelijking kan worden geconcludeerd dat de keuze voor plaatsing van ventielen (kernzijdig of gevelzijdig) niet wezenlijk van invloed is op de bereikte ventilatie efficiëntie. De hoge snelheden in de worp kunnen echter wel tochtverschijnselen veroorzaken en comfort technisch zou daarmee toch tot een voorkeurspositie gekomen kunnen worden. Het type ventiel heeft een grote invloed op zowel de snelheid en de LACI in de leefzone (figuur 4.1 en 4.3). Axiale ventielen kennen een worp die direct de leefzone in is gericht, terwijl de radiale ventielen een inblaas gebied hebben net onder het plafond. Bij axiale ventielen zijn hoge snelheden aanwezig in het midden van de kamer, terwijl voor de radiale ventielen geen hoge snelheden worden berekend in de leefzone. Voor de radiale ventielen wordt daarnaast een betere ventilatie efficiëntie berekend in bijna alle gemonitorde punten met een gemiddelde van 115%, in vergelijking met 100% voor axiale ventielen. Beide ventielen zijn sterk inducerende, maar induceren op verschillende plaatsen in de ruimte. Axiale ventielen induceren in het midden van de kamer, terwijl radiale ventielen induceren in de bovenzijde van de kamer, buiten de leefzone. Verwarming door zonlicht (figuur 4.4) beïnvloedt de LACI voor het niet-verwarmde gedeelte van de ruimte negatief doordat een wervel wordt gecreëerd in het verwarmde gedeelte van de ruimte. De LACI daalt in het niet-verwarmde deel met 18% ten opzichte van de basis variant (figuur 4.1). Wanneer de kamer met een axiaal ventiel wordt verwarmd nemen de snelheden in de ruimte toe, behalve in het inblaas gebied, waar de snelheid afneemt. In gekoelde ruimtes wordt juist de snelheid in de inblaaszone hoger, terwijl de snelheden in de rest van de ruimte ongeveer hetzelfde blijven. Wanneer verwarming of koeling wordt toegepast wordt de lucht in de ruimte beter gemengd. De hogere LACI in de buurt van het inblaas gebied van de axiale ventielen wordt verlaagd, terwijl op de andere punten in de ruimte de LACI dichterbij de 100% komt te liggen (figuur 4.5). Koelen met de radiale ventielen egaliseert de LACI over de gesimuleerde punten. Een gemiddelde waarde van 113% wordt berekend. Figuur 5 toont de warmteafvoer efficiëntie voor de koelsituatie bij de varianten met een verschillend ventiel. Warmteafvoer is minder effectief op alle monitor punten wanneer een axiaal ventiel wordt gebruikt in plaats van een radiaal ventiel. Een axiaal ventiel zorgt daarnaast voor een grotere kans op tochtklachten (16% voorspelde tochtklachten) in vergelijking tot een radiaal ventiel (6% voorspelde tochtklachten). De resultaten zoals besproken laten het effect zien van de onderzochte variaties.

Echter, de varianten zijn vergeleken als zijnde stationaire situaties, waar geen beweging en geen extra interne warmtebronnen worden toegepast. In werkelijkheid zullen mensen in de kamers zorgen voor extra warmtebronnen en beweging, zullen meubels worden geplaatst, en warmte genererende apparaten worden gebruikt. Deze factoren hebben een invloed op de luchtstroming en ventilatie efficiëntie in de ruimte [13; 14]. Ook is in de niet-isotherme modellen uitgegaan van een vaste temperatuur voor de wanden. In werkelijkheid zal er sprake zijn van variatie tussen wanden en gevels. In de variant zonverwarmd resulteerde dit in meer luchtbeweging in het specifieke deel van de kamer. Verwacht mag worden dat al deze aspecten de menging in de ruimte verhogen en de variatie in de LACI waarden zullen verminderen en deze waarden laten convergeren rond een waarde van 100%. De onderzochte varianten worden dus als conservatief beschouwd.

CONCLUSIE

Het lokale effect van de plaatsing van een ventiel op de ventilatie-efficiëntie en het (niet-uniforme) thermisch comfort nabij het ventiel is groot. Echter, voor de rest van de ruimte, ook een wat grotere L-vormige ruimte in een woning, mag de ventilatie-efficiëntie vergelijkbaar, als mengend, beschouwd worden. In de praktijk zal plaatsing van de ventielen in een ruimte vooral worden bepaald door het ontwerp en de plaatsing van de kanalen en zal de kans op tochtklachten leidend moeten zijn bij de keuze.

Het type ventiel dat wordt gebruikt heeft een significant effect op de ventilatie-efficiëntie. Axiale ventielen blazen verse lucht centraal in de ruimte, en inductie vindt plaats in deze zone (deels de leefzone). Radiale ventielen maken gebruik van het Coanda-effect, de lucht wordt geïnduceerd in de buurt van het plafond en daarmee buiten de leefzone. Door de worp van het radiale ventiel is kans op tochtklachten geringer, daarnaast kennen deze ventielen een iets hogere ventilatie efficiëntie met een gemiddelde LACI van 115% in de leefzone, terwijl axiale ventielen een LACI hebben van gemiddeld 100%. Bij een koel- of verwarmingssituatie blijft dit verschil bestaan hoewel minder groot en benadert meer een perfecte mengsituatie. Beide ventielen zijn efficiënt, maar het radiale ventiel is efficiënter (ook ten aanzien van de warmteafvoer efficiëntie) en leidt daarmee tot een meer robuuste oplossing.

REFERENTIES

1. J. van der Pluijm, G. Boxem, M. Loomans en J. Hensen. Effectiviteit balansventilatie in

- woningbouw. TVVL-Magazine, 10 (2012) 16-19.
2. S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan en M.B. Al-Harbi. Heat transfer characteristics in air-conditioned rooms using mixing air-distribution system under mixed convection conditions. *International Journal of Thermal Sciences* 59 (2012) 247-259.
3. S.C. Hu. Airflow characteristics in the outlet region of a vortex room air diffuser. *Building and Environment*, 38(4) (2003) 553-561
4. C.-H. Huang en P.-Y. Lin, P.-Y. Influence of spatial layout on airflow field and particle distribution on the workspace of a factory. *Building and Environment* 71 (2014) 212-222.
5. Ansys. Ansys Fluent User's Guide. Release 15.0 (2013) ANSYS, Inc. Canonsburg (USA).
6. L. de Coo. Ventilation efficiency in a room with mechanical ventilation. Internal report. Eindhoven University of Technology, Eindhoven (2011) 38 pages
7. H.A. Dijkstra. Ventilation efficiency in an L-shaped room. Master thesis. Eindhoven University of Technology. Eindhoven (2015) 31 pages.
8. S. Arts. De toekomst van de doorzonwoning: bewezen kwaliteit (2011) <http://www.bestaandewoningbouw.nl/de-toekomst-van-de-doorzonwoning-bewezen-kwaliteit/> (last visited 2015-12-15)
9. E. Mundt, H.M. Mathisen, P.V. Nielsen en A. Moser. Ventilation effectiveness. *Rehva Guidebook No.2*. Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations (2004)
10. Ashrae. Ashrae Standard 62.1:2013. Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Eng., inc. Atlanta, USA (2013)
11. CEN. ISO 7730:2005(E) Ergonomics of the thermal environment. European Committee for Standardization, Brussels, België (2005) 52 pages.
12. Z. Zhang, W. Zhang, Z. Zhai en Q. Chen. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part-2: comparison with experimental data from literature, *HVAC&R Research*, 13(6) (2007) 871-886.
13. P.V. Nielsen. Computational fluid dynamics and room air movement. *Indoor Air* 2004; 14 (Suppl7) (2004) 134-143
14. P.V. Nielsen. Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*, 91 (2015) 78-90.