

Opinnäytetyö (AMK / YAMK)
Energia- ja polttomoottoritekniikka
ENPOS13
2017

Samu Hokkanen

VOC-PÄÄSTÖLÄHTEIDEN VIRTAUSMALLINNUS



OPINNÄYTETYÖ (AMK / YAMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Energia- ja polltomootoritekniikka

2017 | 50

Eero Immonen ja Pekka Saarinen

Samu Hokkanen

VOC-PÄÄSTÖLÄHTEIDEN VIRTAUSMALLINNUS

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda toimiva virtauslaskentamalli Kuopiossa sijaitsevasta toimistohuoneesta. Toimistohuoneeseen oli sijoitettu kuusi päästölähdettä ja neljä mittauspistettä, joilla mitattiin päästöjen konsentraatioita huoneilmassa tietyn ajanjakson verran. Valmiin virtausmallin tuloksia verrattiin kenttämittauksista saatuihin tuloksiin, ja näin varmistettiin mallin toimivuus.

Virtausmalli tehtiin kokonaisuudessaan ANSYSin ohjelmistolla, joka on virtausmallien luomiseen tarkoitettu CFD-ohjelmisto. Malliin tehtiin virtausgeometria, laskentaverkko ja alustus laskentaa varten, minkä jälkeen alettiin laskea tuloksia. Laskentaverkossa oli yli 2,5 miljoonaa laskentapistettä, rajakerrosverkko oli keskimäärin 2,0 cm paksuinen ja turbulenssimallina käytettiin k-omega SST-mallia sen ominaisuuksien vuoksi.

Tulokset olivat samankaltaisia tehtyjen mittausten kanssa, joskin mallissa päästöjen konsentraatiokeskiarvot olivat suuremmat kuin todellisuudessa. Yhden päästölähteen konsentraatiot malli arvioi jonkin verran alakanttiin. Myös mittauspisteiden tarkkuudessa oli eroa. Malli toimi kutakuinkin odotusten mukaisesti.

Mittauksien ja mallin tuloksien erot johtuivat osittain käytetystä turbulenssimallista sekä mittausten vajavaisuudesta. Vaikka RANS-yhtälöiden sijaan käytettiin URANS-yhtälöitä, joissa on epävakaa termi liikeyhtälöissä mukana, ei malli kykene tarkasti ennustamaan nopeita heilahteluita ja suuren skaalan turbulenssia, joka on päästöjen leviämistä laskettaessa tärkeä. Tarkempien tuloksien saamiseksi mallissa pitää tarkentaa rajakerrosverkkoa ja käyttää LES-mallia (large eddy simulation).

ASIASANAT:

Rajakerrosteoria, Y+, päästökonsentraatio, turbulenssi, CFD

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and internal combustion engine technology

2017 | 50

Eero Immonen ja Pekka Saarinen

Samu Hokkanen

CFD SIMULATION OF VOC EMISSION SOURCES

The goal of this thesis was to create a functioning CFD simulation model from an office room that resides in Kuopio. Six emission sources and four measuring points were placed in the room to measure emission concentrations in the air over a certain time period. The validity of the CFD simulation model was ensured by comparing the simulation results to the experimental data.

The CFD simulation model was made completely with ANSYS software. The model was comprised of flow geometry, mesh, initialization and results. The mesh had over 2.5 million nodes, the boundary layer mesh was 2.0 cm thick on average and k-omega SST model was chosen to predict the turbulence due to its traits.

The simulation results were similar with the experimental data, although the simulation overpredicted the emission concentrations. The model underestimated the concentrations of one of the emission sources. The accuracy of the measurement points also varied. The simulation model worked reasonably as intended.

The difference in the results of the model and experimental data was partly due to the used turbulence model and the defectiveness of the measurements. RANS equations were replaced with URANS equations for a more realistic simulation. Despite the unsteady term that is present in the URANS momentum equation, the simulation cannot predict fast fluctuations and the large-scale turbulence, which is imperative when calculating turbulent mixing. To acquire more accurate results, the boundary layer mesh must be thickened and URANS replaced with LES (large eddy simulation).

KEYWORDS:

Boundary layer theory, Y+, emission concentration, turbulence, CFD

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 GEOMETRIA	8
3 LASKENTAVERKKO	14
3.1 Rajakerroksen verkko	15
3.2 Y+ arvot	16
4 REUNAEHDOT	22
4.1 Tulo ja poisto	22
4.2 Termodynamiikka	22
4.3 Turbulenssimalli	22
4.4 Päästölähteet	23
4.5 Monitorointipisteet	24
4.6 Aikariippuvuus	25
4.6.1 RANS	26
4.6.2 URANS	27
4.7 Lasketut tapaukset	27
5 TULOKSET	28
5.1 Suutinasentojen vaikutus	28
5.2 Epäpuhtauskonsentraatioiden heilahtelu	30
5.3 Epäpuhtauskonsentraatioiden keskiarvot	39
5.4 Erot mittauspisteissä	43
6 LOPUKSI	46
LÄHTEET	47
KUVALÄHTEET	49

LIITTEET

Liite 1. Päästökeskiarvojen laskentataulukot

KUVAT

Kuva 1 Yleiskuva virtausgeometriasta	8
Kuva 2 Huoneen virtausesteet	9
Kuva 3 Katon virtausesteet	10
Kuva 4 Tuloilmalaite	11
Kuva 5 Ensimmäinen suutinasento	12
Kuva 6 Toinen suutinasento	12
Kuva 7 Poistoilmalaite	13
Kuva 8 Poikkileikkaus laskentaverkosta	15
Kuva 9 Seinän rajakerrosverkko	16
Kuva 10 Ensimmäisen laskentaverkon Y+ arvot	17
Kuva 11 Lämpötehon vaikutus Y+ arvoihin	18
Kuva 12 Toisen laskentaverkon Y+ arvot	19
Kuva 13 Kolmannen laskentaverkon Y+ arvot	20
Kuva 14 Neljännen laskentaverkon Y+ arvot	21
Kuva 15 Päästölähteet	24
Kuva 16 Monitorointipisteet	25
Kuva 17 Virtausnopeuden aikakeskiarvottaminen (learn engineering)	26
Kuva 18 Ensimmäisen suutinasennon heittokuvio	29
Kuva 19 Toisen suutinasennon heittokuvio	30
Kuva 20 Kloorioktaanin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	31
Kuva 21 Kloorioktaanin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	32
Kuva 22 Etyyliheksanolin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	33
Kuva 23 Etyyliheksanolin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	33
Kuva 24 Butoksietanolin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	34
Kuva 25 Butoksietanolin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	34
Kuva 26 Etyylibentseenin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	35
Kuva 27 Etyylibentseenin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	36
Kuva 28 Undekaanin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	37
Kuva 29 Undekaanin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	37
Kuva 30 Tolueenin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa	38
Kuva 31 Tolueenin konsentraation vaihteluväli mittauksissa	38
Kuva 32 Kloorioktaanin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	39
Kuva 33 Etyyliheksanolin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	40
Kuva 34 Butoksietanolin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	41
Kuva 35 Etyylibentseenin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	42
Kuva 36 Undekaanin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	42
Kuva 37 Tolueenin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus	43
Kuva 38 Backstep flow -ilmiö (article sapub 2013)	44
Kuva 39 Backstep flow toimistohuoneessa	45

TAULUKOT

Taulukko 1 Lasketut tapaukset	27
---	----

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin osana SaVOC-projektia. Projektissa tutkittiin Kuopion yliopistollisessa sairaalassa ilmeneviä sisäilmaongelmia. Opinnäytetyössä mallinnettiin sairaalan toimistohuoneessa tehty koejärjestely, jossa tutkittiin ilmanvaihtoa sekä huoneilmassa esiintyviä epäpuhtauksia ja näiden epäpuhtauksien pitoisuuksien jakaantumista huoneeseen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaava virtausmalli Kuopion yliopistollisessa sairaalassa sijaitsevasta toimistohuoneesta. Mallin toimivuus varmistettiin vertaamalla virtauslaskennasta saatuja tuloksia kenttämittauksissa saatuihin arvoihin. Mallin avulla saadaan tietoa siitä, miten ilma ja epäpuhtaudet liikkuvat huoneessa ja onko ilmanvaihto tarpeeksi tehokas pitämään epäpuhtauskonsentraatiot tarpeeksi matalina.

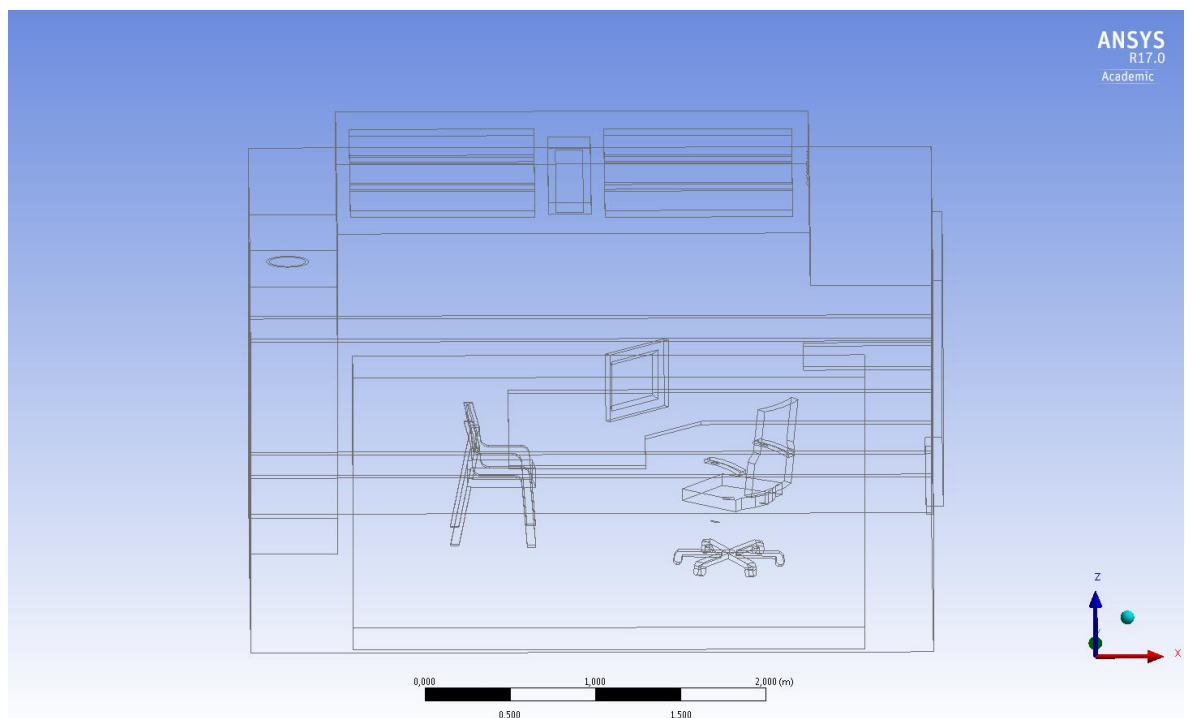
Virtausmalli ja -laskenta tehtiin CFD-laskentaan suunnitellulla ANSYS-ohjelmistolla, joka laskee fluidin käyttäytymistä ja turbulenssia Navier-Stokes-yhtälöiden avulla. Koska tarkan ratkaisun numeerinen laskenta on liian työlästä, opinnäytetyössä käytettiin ajan säästämiseksi aikakeskiarvotettuja Navier-Stokesin yhtälöitä. Aikakeskiarvottamisen seurauksena ilmaantuu uusia tuntemattomia, niin kutsuttuja Reynoldsin jännityksiä, joiden laskemiseksi tarvitaan turbulenssimalli.

Ensimmäiseksi luotiin toimistohuoneesta 3D-malli, johon mallinnettiin merkittävimmät virtausesteet. Seuraavaksi malliin tehtiin laskentaverkko, jonka avulla ohjelma kykenee laskemaan virtauskentän liikkeitä. Tämän jälkeen laskenta alustettiin syöttämällä parametreja, jotka antavat laskentaohjelmalle tietoa virtaustilanteesta vallitsevista fysikaalisista oloista. Viimeisenä ohjelma laitettiin laskemaan tulokset, joita tulkittiin jälkikäsitteilyohjelmalla.

CFD-mallinnus on alana kasvanut merkittävästi teknologian kehittymisen myötä. Laskentojen suorittamiseen on saatu yhä enemmän prosessitehoa. Mallinnus on helpompaa ja kustannuksiltaan edullisempaa kuin kalliiden koejärjestelyiden ja pienoismallien tekeminen. Aihe valittiin siksi, että ala kasvanee lähitulevaisuudessa enemmänkin.

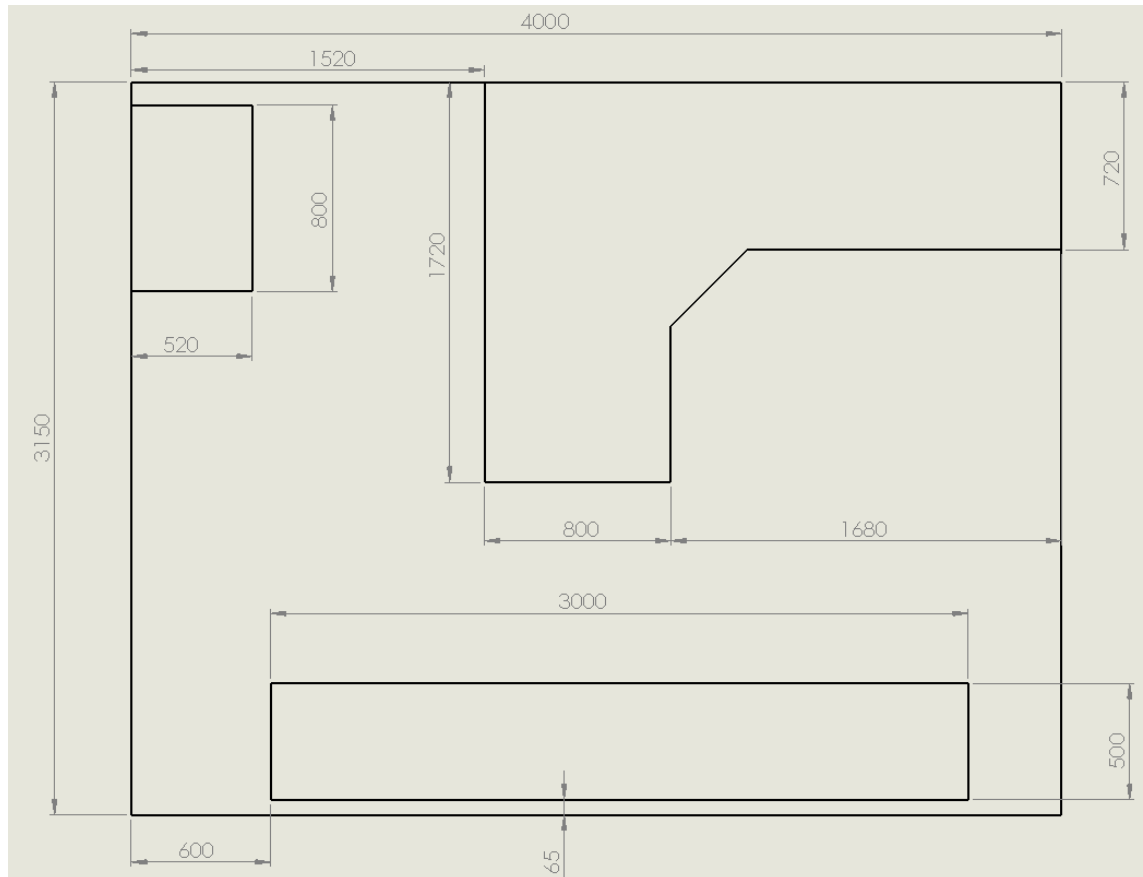
2 GEOMETRIA

Toimistohuoneen geometria mallinnettiin saatujen mittapiirustusten sekä valokuvien perusteella ANSYS Design Modeler -ohjelmalla (kuva 1). Toimiston 3D-mallia tehdessä pyrittiin mallintamaan virtauksen kannalta oleelliset esteet, kuten kaapit, komerot, tuolit, katon akustiikkalevyt ja pöydät. Toimiston mitat olivat: Pituus 4 m (X-koordinaatti), leveys 3,15 m (Y-koordinaatti) ja korkeus 2,54 m (Z-koordinaatti). Geometria sijoitettiin karteesisen koordinaatiston siten, että origo sijaitsi toimistohuoneen vasemmassa alakulmassa Z-akselin arvojen kasvaessa kattoa kohti.



Kuva 1 Yleiskuva virtausgeometriasta.

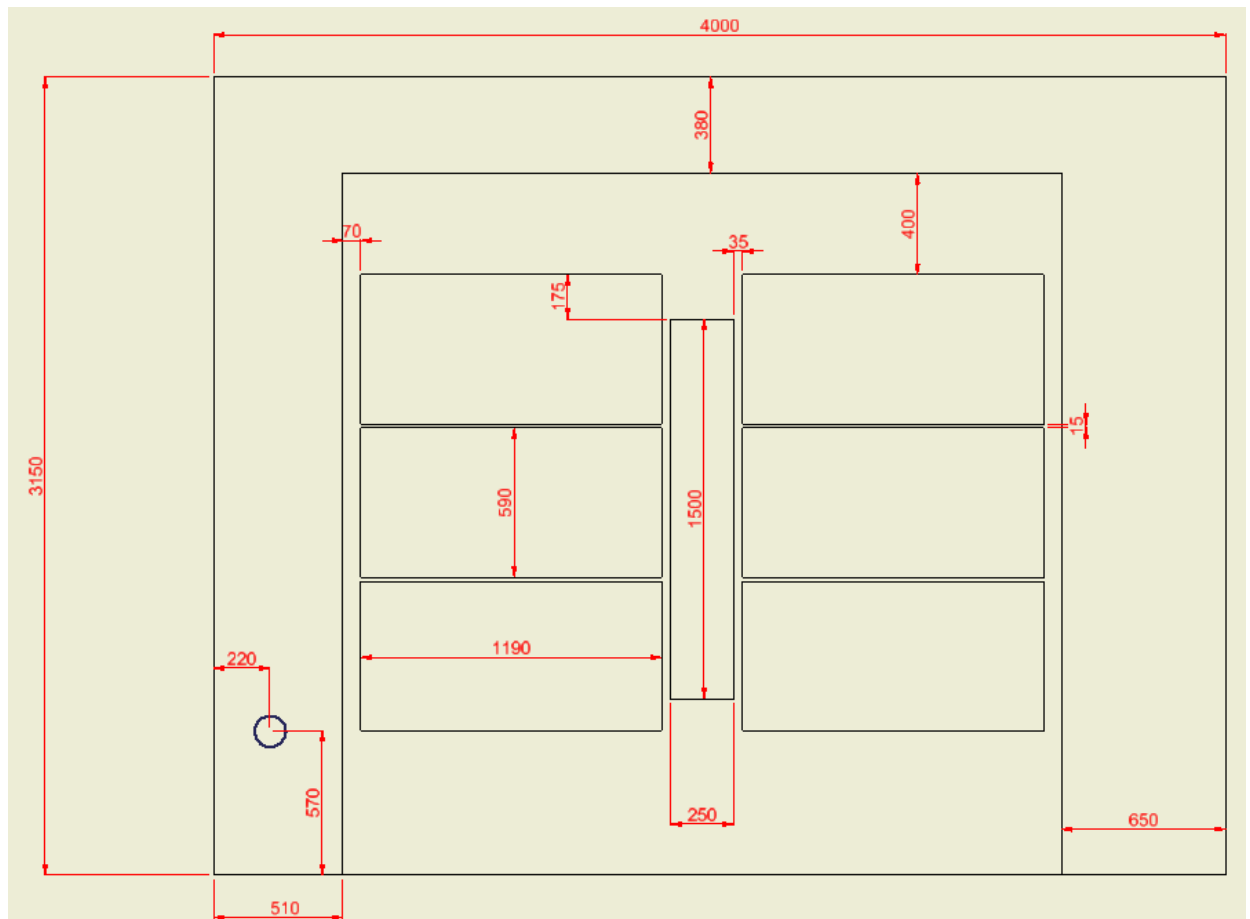
Kuva 2 esittää lattiatason merkittävimpiä virtausesteitä. Toimistossa olevan kaapin ja komeron mitat oli annettu, mutta toimistopöydän mitat arvioitiin valokuvien perusteella. Geometria luotiin tekemällä toimistohuoneen päämittojen mukaan suorakulmainen särmiö, johon leikattiin aukkoina merkittävimmät virtausesteet. Kaappien ja pöytien lisäksi mallinnettiin yksi toimistotuoli, yksi puujakkara sekä tietokoneen näyttö.



Kuva 2 Huoneen virtausesteet.

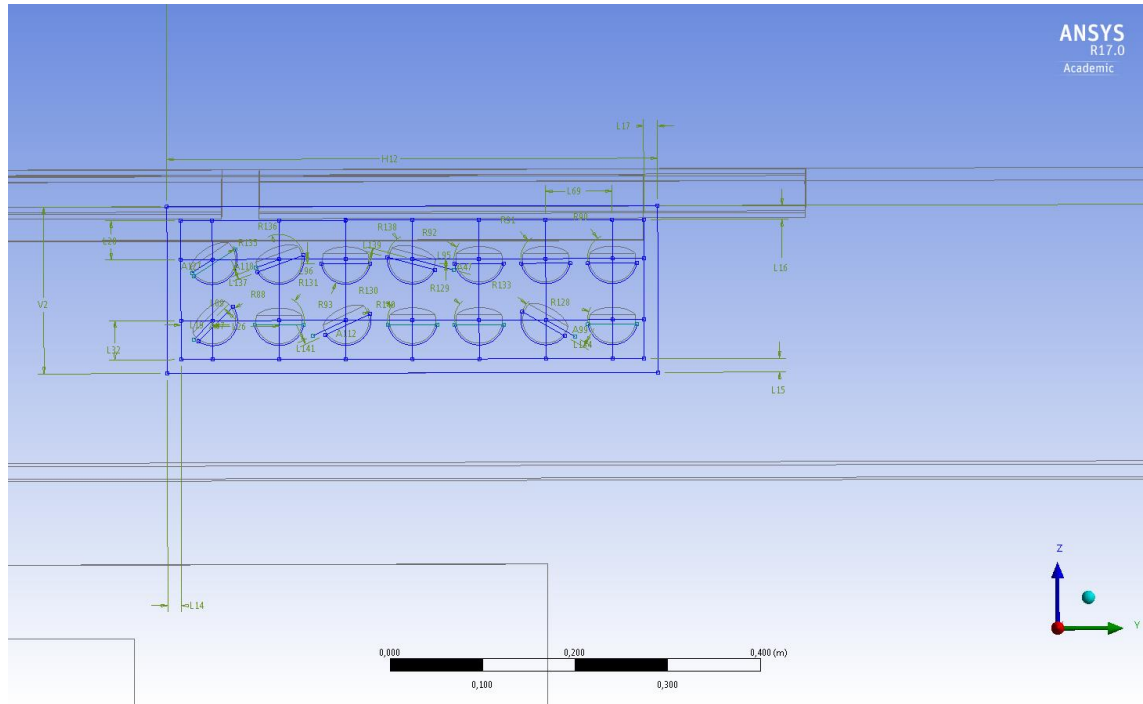
Toimistotuolin 3D-malli otettiin aikaisemmin SaVOC-projektissa tehdystä virtausmallista. Tuoli sijoitettiin huoneeseen luomalla lokaaliorigo koordinaatteihin X:2,58 m ja Y:2,15m, jonka jälkeen origoa pyöräytettiin Z-akselin ympäri 235 astetta. Myös puujakkaran 3D malli saatiin aikaisemmista projektitiedostoista. Jakkara sijoitettiin koordinaatteihin X:1,68 m ja Y:2,65 m. Tietokoneen näyttö mallinnettiin itse, ja se sijoitettiin koordinaatteihin X:1,88 m Y:2,53 m ja Z:0,8 m, jonka jälkeen näyttöä varten luotua origoa pyöräytettiin 45 astetta Z-akselin ympäri.

Kuva 3 esittää katon virtausesteitä mittoineen. Katossa merkittävimmät virtausesteet olivat kanavakotelo, kattovalaisin ja akustiikkalevyt. Kanavakotelosta sekä akustiikkalevyistä annettiin tarkat mitat, valaisimen mitat arvioitiin valokuvien perusteella.



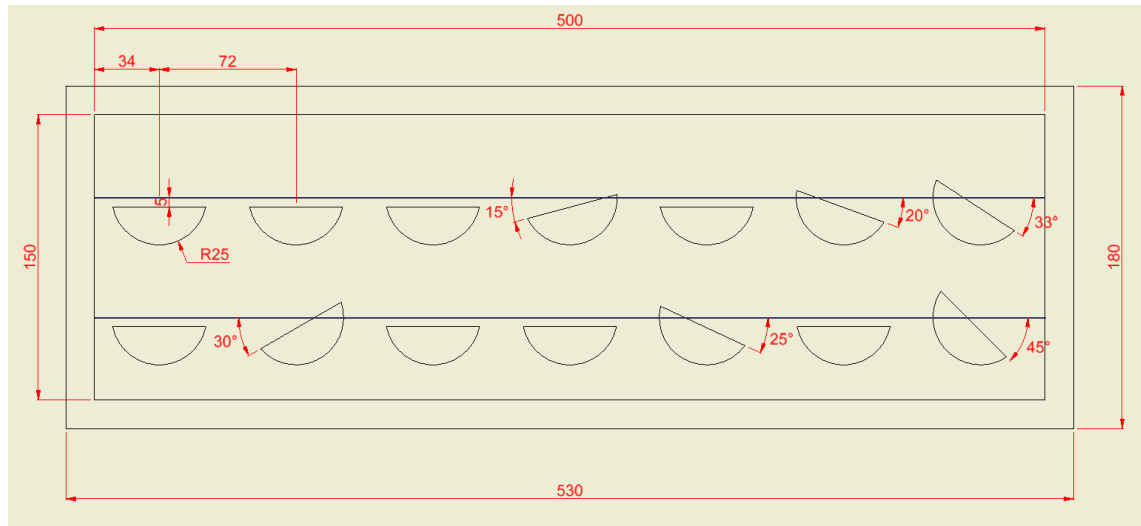
Kuva 3 Katon virtausesteet.

Kuva 4 esittää tuloilmalaitteen 3D-mallia. Tuloilmalaitteeseen mallinnettiin leikkaamalla virtausalueen reunalle pallokalotin muotoisia aukkoja. Suuttimien mallinnusta varten piirrettiin apuristikko, jossa oli seitsemän pysty- ja kaksi vaakariviä. Apuristikon risteyskohtia käytettiin pallokalottien keskipisteenä. Ristikoon piirrettiin myös akseleita, joiden avulla kalotit asetettiin kulmaan suuttimen suuntauksen ollessa muualle kuin suoraan ylöspäin.



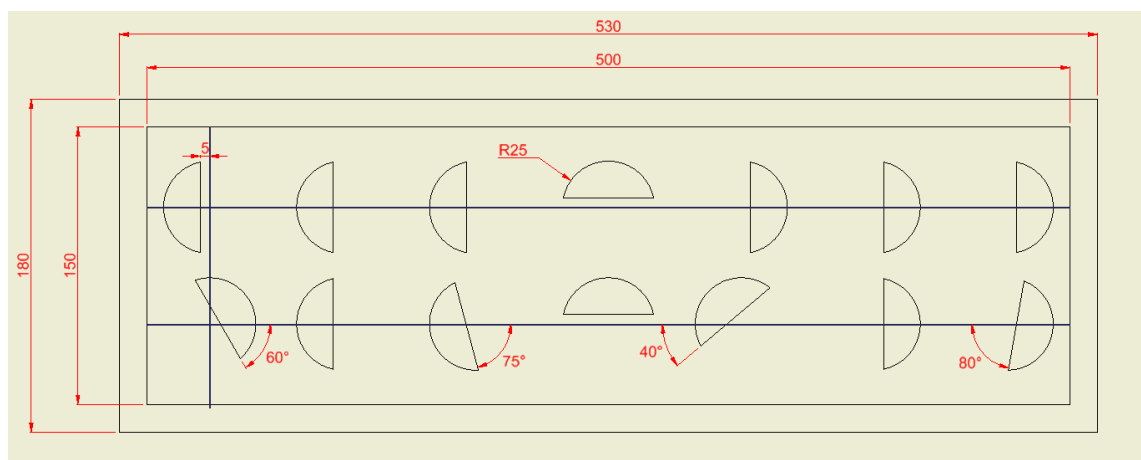
Kuva 4 Tuloilmalaitte.

Suuttimien suuntauksesta tehtiin kaksi eri versiota Kuopiosta tulleiden valokuvien perusteella. Kuva 5 esittää ensimmäistä suuntausvaihtoehtoa, jossa suurin osa suuttimista osoitti suoraan ylöspäin.



Kuva 5 Ensimmäinen suutinasento.

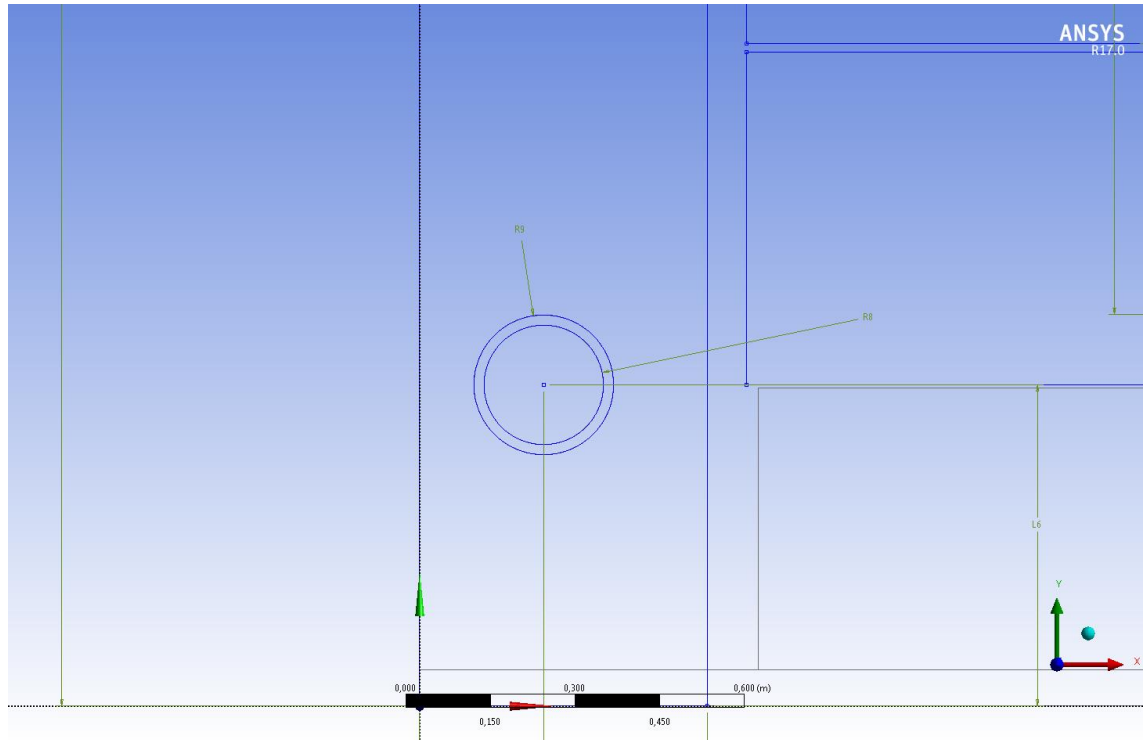
Kuva 6 esittää toista suuntausvaihtoehtoa, jossa kaksi keskimmäistä suutinta osoittivat suoraan alas, ja loput suuttimet suunnattiin kutakin suutinta lähimpänä olevaan seinään.



Kuva 6 Toinen suutinasento.

Tuloilmalaite oli Swegonin T1-125 VDYc. Teknisissä tiedoissa ei mainittu suoraan suuttimien halkaisijaa, joten tämä arvioitiin otettujen valokuvien perusteella. Pallokalottien halkaisijaksi annettiin 50 mm, ja ne leikattiin materiaaliin 30 asteen kulmaan.

Kuva 7 esittää mallinnettua poistoaukkoa. Poistoaukko mallinnettiin luomalla kattoon kaksi erikokoista ympyrää, joille määriteltiin sama keskipiste. Sisemmän ympyrän halkaisijaksi annettiin 106 mm, ja ulomman ympyrän halkaisijaksi annettiin 124 mm.



Kuva 7 Poistoilmalaite.

Poistoilmalaite oli Swegonin KSOJ-125. Teknisissä tiedoissa ei mainittu suoraan poistoaukon kokoa, vaan tämä arvioitiin valokuvien perusteella.

3 LASKENTAVERKKO

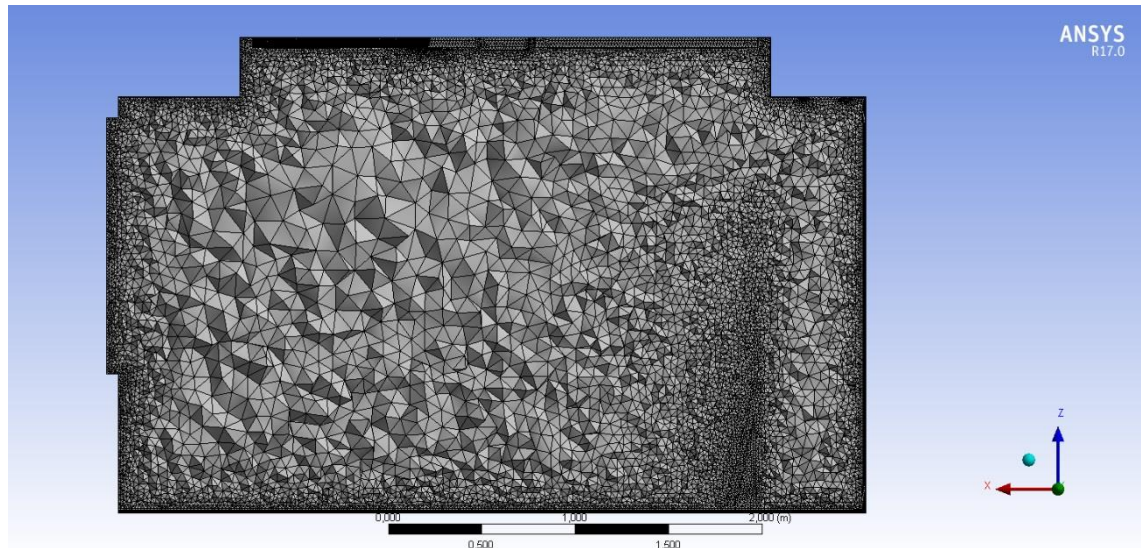
Laskentaverkko luotiin ANSYS Design Modeler -ohjelmalla. Verkon tarkkuuden vaikutus tuloksiin haluttiin selvittää, joten verkkoja tehtiin neljä erilaista. Verkot tehtiin erilaisiksi lisäämällä rajakerrospintoja sekä pienentämällä laskentakoppien kokoa pintojen läheisyydessä.

Ensimmäisessä verkossa laskentapisteiden määrä oli 1698320 kappaletta ja rajakerrosverkko luotiin ainoastaan kattoon. Koppien koko pinnoilla pienennettiin oletusarvosta kokoon 0,018 m². Ensimmäisen verkon tarkoitus olikin olla helpohko perusverkko, jolla testattiin mallin toimivuus ja selvitettiin rajakerrosverkon luomiseen liittyvät ongelmatilanteet. Ainoa rajakerrosverkon luomiseen liittyvä ongelma johtui virtausgeometrian jyrkistä kulmista ja ongelma korjaantui pinnalla sijaitsevien koppien kokoa pienentämällä.

Toisessa verkossa laskentapisteiden määrää lisättiin 1953583 kappaleeseen. Lisäksi rajakerrosverkko lisättiin huoneen yhteen seinän yläosaan katon lisäksi. Rajakerrosverkkoa myös tehtiin paksummaksi paremman laskutarkkuuden saavuttamiseksi.

Kolmannessa verkossa laskentapisteiden määrä lisättiin vielä enemmän 3076421 kappaleeseen pienentämällä koppien kokoa arvosta 0,018 m² arvoon 0,016 m² seinämien pinnassa. Tämän seurauksena laskenta hidastui niin paljon, että tehtiin vielä neljäs verkko, jossa laskentapisteiden määrää laskettiin 2579108 kappaleeseen. Lisäksi rajakerrosverkko luotiin myös lattiaan ja kolmeen seinään.

Kuva 8 esittää lopullisen laskentaverkon poikkileikkausta. Lopullisessa laskentaverkossa oli 2579108 laskentapistettä. Koppien koko pinnoilla oli 0,016 m², ja rajakerroksen paksuus oli katossa 3,8 cm, seinissä 2,0 cm ja lattiassa 2,0 cm. Ikkunan puoleiseen seinään ei luotu rajakerrosverkkoa.



Kuva 8 Poikkileikkaus laskentaverkosta.

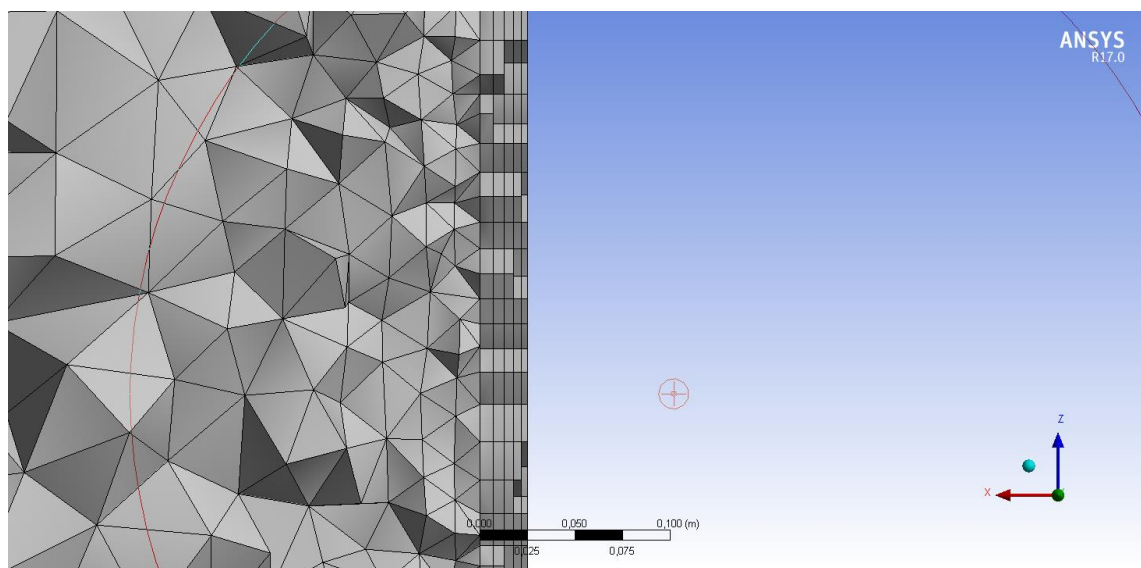
3.1 Rajakerroksen verkko

Seinämien läheisyydessä viskositeetin vaikutus virtauksen luonteeseen kasvaa aiheuttaen kitkaa virtauksen ja seinämän välille, joten laskentaverkon on oltava näillä alueilla tarkempi. Virtauksen käyttäytymistä mallinnettaessa seinämien läheisyydessä käytetään hyödyksi Ludwig Prandtin kehittämää rajakerrosteoriaa. Prandtin rajakerrosteorian mukaan virtaus jaetaan kahteen osaan: virtausalueeseen seinän lähellä, missä virtaus on viskoosisen kitkan vaikutuksen alaisena sekä virtausalue edellä mainitun alueen ulkopuolella, missä virtaus käyttäytyy ideaalivirtauksen tavoin. Rajakerros muodostuu sille alueelle, jossa virtaukseen vaikuttaa viskoosinen kitka. Rajakerros voi olla laminaarinen tai turbulenttinen. (Nakayama & Boucher 1999, 101.)

Viskoosinen kitka vaikuttaa virtaukseen siten, että jos päävirtauksella on nopeus U , niin aivan seinämän pinnassa virtauksen nopeus on kitkan vaikutuksesta nolla. Tästä syystä, ja viskoosisen kitkan vaikutuksesta johtuen virtauksen nopeus seinän läheisyydessä vaihtelee jatkuvasti nollasta nopeuteen U . Toisin sanoen, seinän lähellä on ohut kerros, jossa nopeuden gradientti on suuri. (Schlichting & Gersten 2003, 29.)

Koska virtaus käyttäytyy seinämien läheisyydessä eri lailla kuin vapaassa tilassa, pitää laskentaverkon olla näillä alueilla erilainen. Kopit ovat muodoltaan prismoja ja kooltaan pienempiä suuremman laskutarkkuuden aikaan saamiseksi.

Kuva 9 esittää seinään luotua rajakerrosverkkoa. Rajakerrosverkko luotiin virtausmallissa alueille, joissa virtaus osui virtausalueen seinämään. Rajakerrosverkkoon tehtiin viisi kerrosta vain kokonaispaksuus määrittäen. Koppien leveys kasvaa kerroksittain erikseen määritellyn kasvukertoimen mukaan, joka oli 1,2. Katossa sijaitseva rajakerrosverkko tehtiin 3,8 cm paksuksi jokaiseen verkkoon, ja niissä verkoissa, joissa rajakerros luotiin myös seiniin ja lattiaan, määriteltiin rajakerroksen paksuudeksi näillä alueilla laskennoista saatujen $Y+$ arvojen perusteella 2,0 cm lattiasa sekä kaikissa seinissä paitsi ikkunan puoleisessa seinässä.



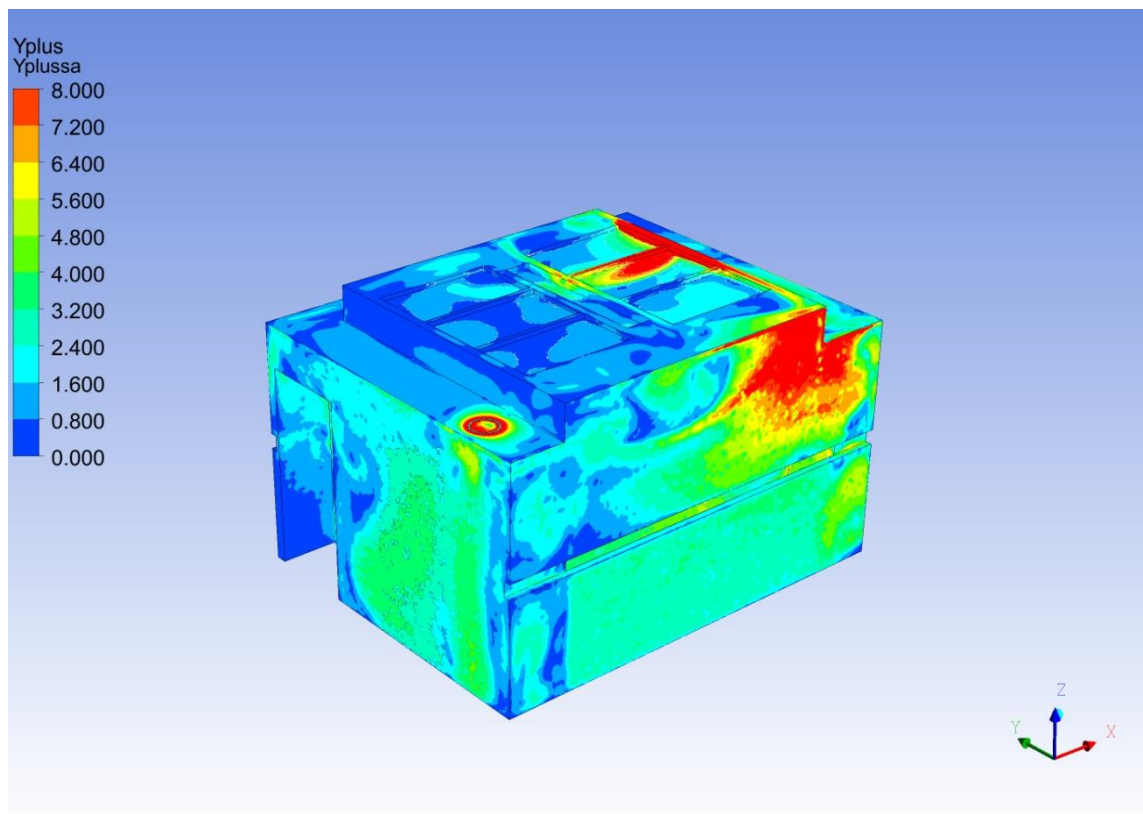
Kuva 9 Seinän rajakerrosverkko.

3.2 $Y+$ arvot

$Y+$ on rajakerrosteoriaan liittyvä suureton etäisyys seinästä ensimmäiseen laskentapisteeseen. $Y+$:n arvoja virtauksen rajapinnoissa tarkastelemalla saadaan tietoja laskentaverkon tarkkuuden riittävydestä. Käytetty turbulenssimalli ei välttämättä simuloi turbulenssia halutulla tarkkuudella, mikäli $Y+$ arvot eivät ole kyseiselle turbulenssimallille oikean kokoisia. Varsinaisia ”oikeita” $Y+$ arvoja ei ole olemassa, vaan kaikki tilanteet ovat tapauskohtaisia. $Y+$ arvot ollessa erittäin pieniä (<2) saadaan laskettua rajakerrosverkon profiili tarkkaan. Tämä ei kuitenkaan ole tarpeellista suurimpaan osaan laskentatapauk-

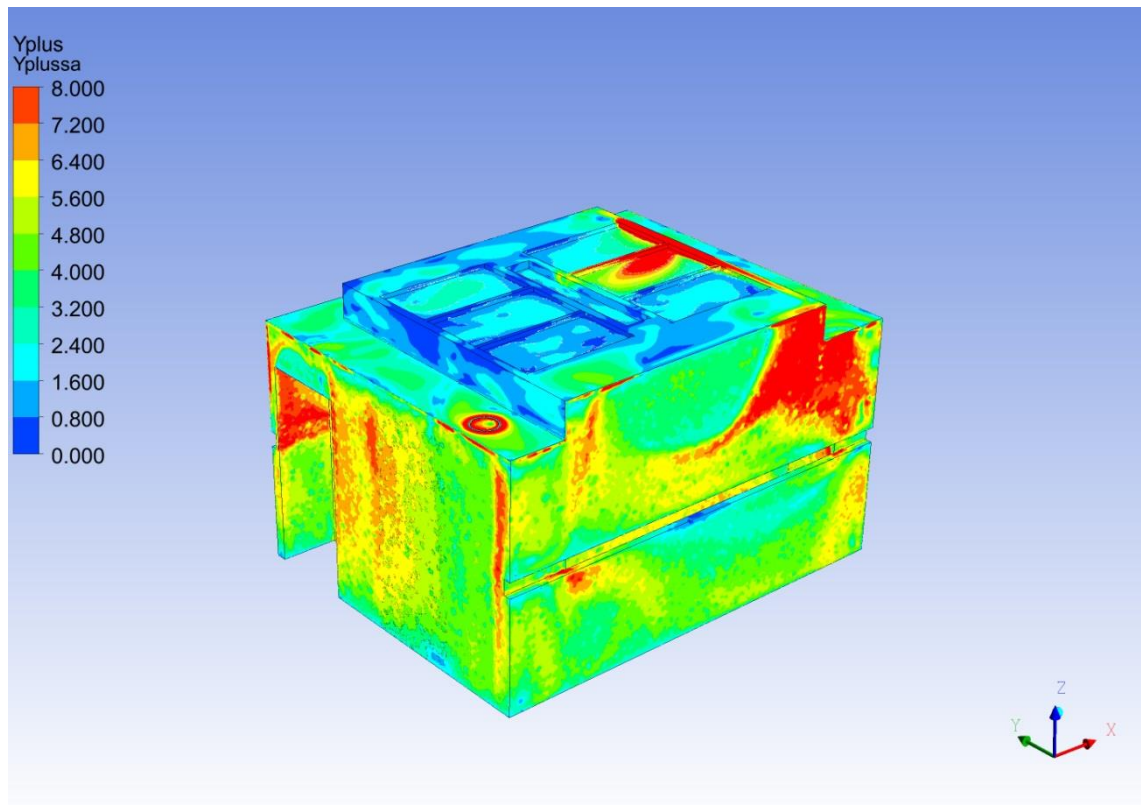
sia. Näissä laskennoissa käytetylle turbulenssimallille halutun suurin Y^+ arvo oli välillä 1-5, ja vähintään $<11,06$. (LearnCax, 2017; Menter ym. 2003; ANSYS-CFX Solver Theory Guide 2011, 141.)

Kuva 10 esittää ensimmäisen laskentaverkon Y^+ arvoja. Rajakerrosverkko on luotu ai-noastaan kattoon, jonka johdosta seinissä, joihin ilma virta osuu kovalla nopeudella, Y^+ arvot ovat korkeat. Laskennassa käytetylle turbulenssimallille punaisella alueella olevat arvot ovat liian korkeita, joten verkkoa muokattiin tarkemmaksi.



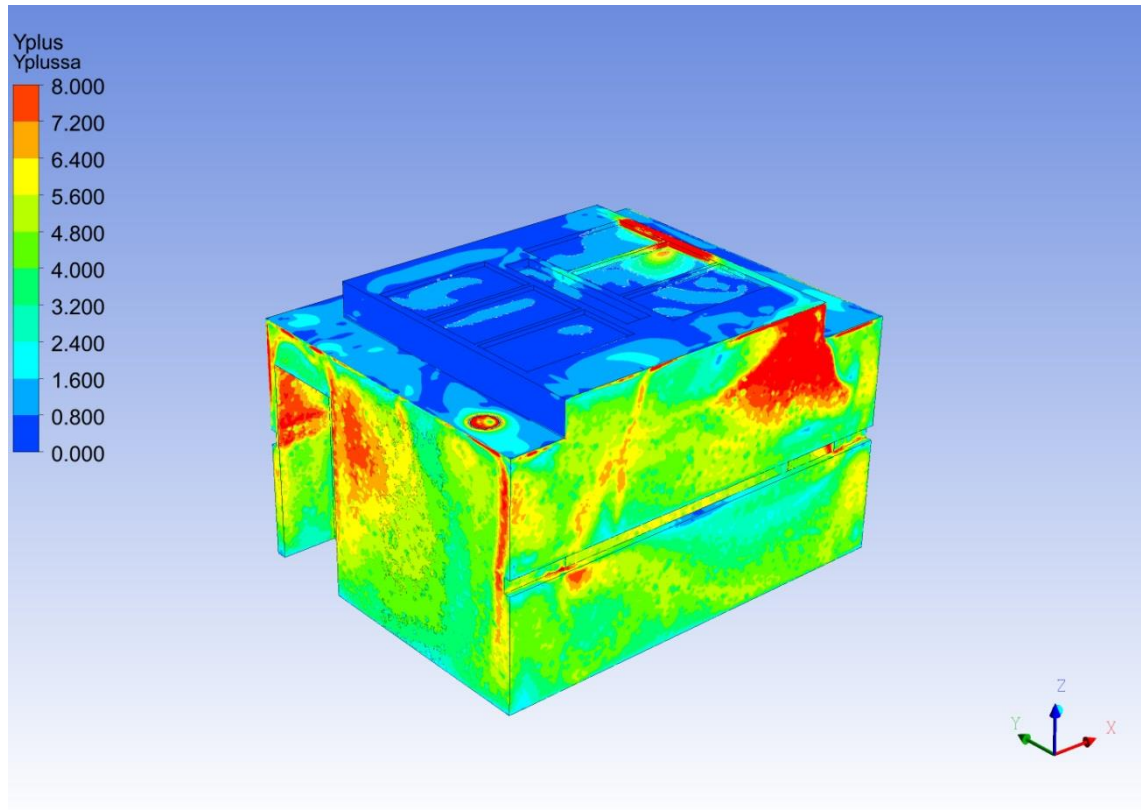
Kuva 10 Ensimmäisen laskentaverkon Y^+ arvot.

Kuva 11 esittää kattovalaisimesta aiheutuvan lämpötehon vaikutusta Y+ arvoihin. Verkko on sama kuin kuvassa 10. Y+ arvojen kasvu selittyy sillä, että ilman lämmitessä sen tiheys pienenee, joten tuloilmalaitteesta tulevan viileämmän ilman on helpompi työntää tilassa olevaa lämpimämpää ilmaa aiheuttaen suuremmat virtausnopeudet seinien läheisyyteen.



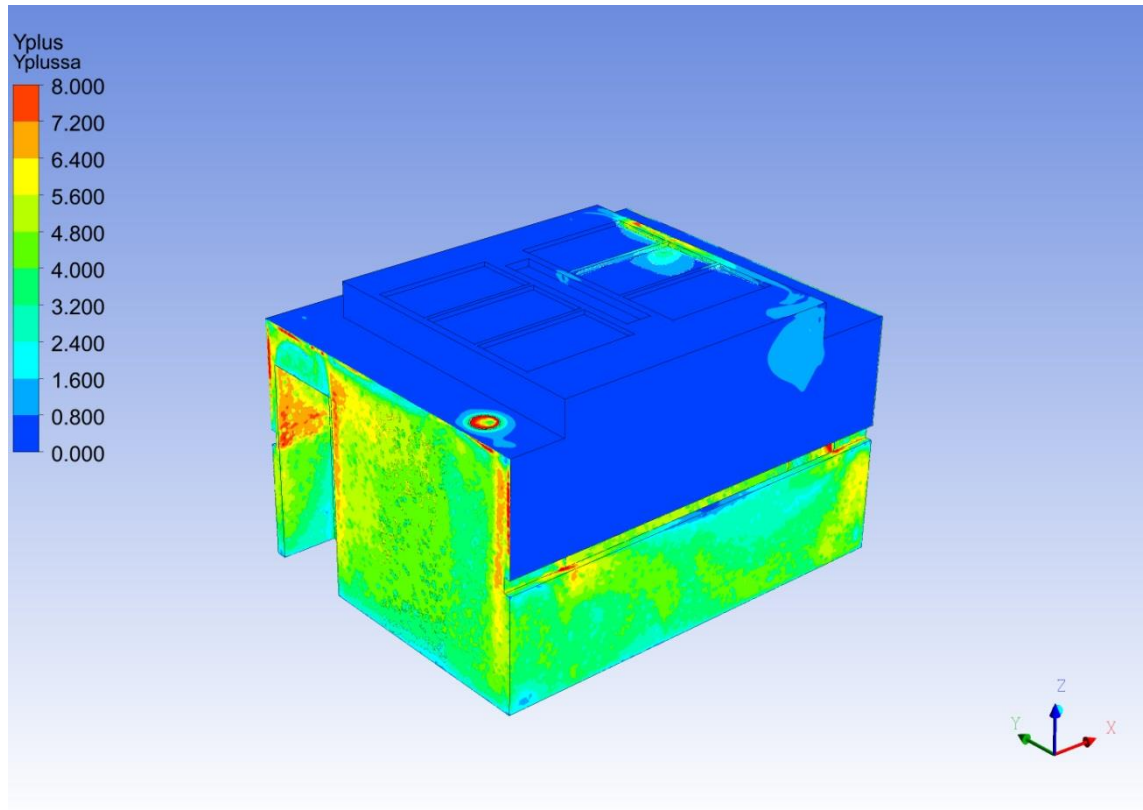
Kuva 11 Lämpötehon vaikutus Y+ arvoihin.

Kuva 12 esittää toista laskentaverkkoa. Lämpötehojen johdosta kasvaneet Y+ arvot pyrittiin saamaan pienemmiksi parantamalla rajakerrosverkkoa ja pienentämällä koppikokoja. Kuvassa 12 näkyy, kuinka rajakerroksen tarkentaminen katossa pienensi Y+ arvoja sillä alueella. Laskennassa käytetty verkko ei vastannut viime verkossa esiintyneeseen ongelmaan, joka ilmeni suurina Y+ arvoina seinissä.



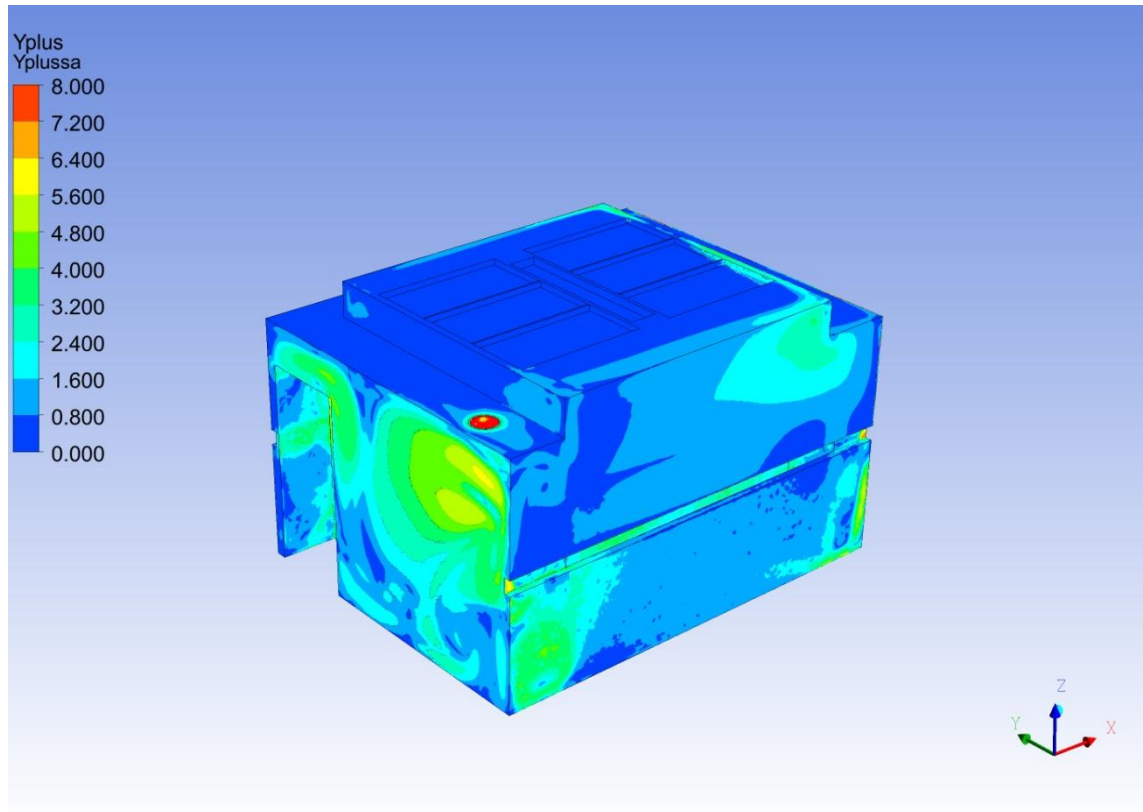
Kuva 12 Toisen laskentaverkon Y+ arvot.

Kuva 13 esittää kolmatta laskentaverkkoa. Kolmannen verkon tapauksessa Y+ arvot ovat katon ja seinän yläosan tuntumassa jo liian pienet. Y+ arvojen ollessa liian pienet turbulenssin mallinnus voi tulla liian herkäksi, aiheuttaen liian suuria turbulenssiarvoja, jotka eivät ole realistisia. Lisäksi rajakerroksen laminaaristen osien laskenta käy liian tarkaksi siihen nähden, että laminaariset komponentit eivät ole konsentraatioiden laskennan kannalta yhtä tärkeitä kuin turbulenssiset komponentit. (computational fluid dynamics 2013.)



Kuva 13 Kolmannen laskentaverkon Y+ arvot.

Kuva 14 esittää neljättä laskentaverkkoa. Lopullisten tulosten laskemiseksi käytettiin tätä laskentaverkkoa. Kyseisessä verkossa Y+ arvot osuivat parhaiten käytetyn turbulenssimallin vaatimaan haarukkaan. Arvoista näkee, että verkko on tarpeeksi tarkka laskemaan laminaarisen alakerroksen (laminar sublayer) riittävällä tarkkuudella kuitenkin tekemättä sitä turhan yksityiskohtaisesti. (computational fluid dynamics 2013.)



Kuva 14 Neljännen laskentaverkon Y+ arvot.

4 REUNAEDOT

4.1 Tulo ja poisto

Tuloaineeksi määriteltiin 25 °C:n kokoon puristumaton ilma, jonka tiheys oli 1,18 kg/m³. Tuloaineen massavirraksi laitettiin lähtötietojen perusteella 0,03835 kg/s. Poisto määriteltiin paineen ulostulona (pressure outlet).

4.2 Termodynamiikka

Mallinnuksessa haluttiin selvittää lämpötehojen mahdollinen vaikutus virtauskenttään. Tästä syystä laskentoja toteutettiin lämmön suhteen kahdella eri tavalla: isotermisenä ja kattolampun lämpöteho huomioituna.

Lämpötehon vaikutuksen laskemiseksi arvioitiin kattovalaisimen tuottama lämpöteho. Valokuvien perusteella loisteputki on n. 1,5 m pitkä, joten sen teholuokka on 30–80 W. Kattovalaisimen lämpötehoksi arvioitiin 60 W. Laskemalla lämpötilan muutos ΔT kaavasta $Q = \rho m' c_p \Delta T$, jossa $Q =$ lampun lämpöteho (60 W), $\rho =$ Ilman tiheys (25 °C ilmalle 1,18 kg/m³), $m' =$ Tuoreilman massavirta (0,03835 kg/s), ja $c_p =$ ilman ominaislämpökapasiteetti (1000 J/kg*°C), voitiin arvioida, onko valaisimelle määritetty lämpöteho realistinen. Laskemalla kaava annetuilla arvoilla lämpötilan muutokseksi saatiin 1,33 °C.

Lämpötilan pienestä noususta johtuen kattolampun lämpötehon ei katsottu vaikuttavan merkittävästi laskentaan. Lopullinen laskenta suoritettiin tästä syystä isotermisenä.

4.3 Turbulenssimalli

Virtausmallissa esiintyvän turbulenssin mallinnukseen käytettiin Florian Menterin kehittämää k-omega SST (shear stress transport) turbulenssimallia. Kyseinen turbulenssimalli on niin sanottu kahden yhtälön malli, joka tarkoittaa sitä, että se sisältää kaksi ylimääräistä kuljetusyhtälöä turbulენტtisten ominaisuuksien mallintamiseksi. Näiden kahden muun yhtälön avulla malli pystyy huomioimaan turbulენტtisen energian diffuusiota

sekä konvektiota. Ensimmäinen muuttuja k kuvaa turbulentiasta kineettistä energiaa ja toinen muuttuja ω kuvaa edellä mainitun energian ominaishaihtumista. (CFD-online 2011.)

Kyseinen malli valittiin siksi, että $k-\omega$ SST laskee virtauksen irtoamista ja uudelleen kiinnittymistä hyvin. Lisäksi SST-malli on yksi tarkin malli laskemaan virtausta seinän lähellä. SST-malli laskee rajakerroksen sisäosat $k-\omega$ mallilla ja vaihtaa vapaavirtauksessa $k-\epsilon$ malliin täten yhdistäen molempien mallien parhaita puolia. (CFD-online 2011; engineering.com 2016.)

4.4 Päästölähteet

Hengitysilmassa olevat epäpuhtauslähteet ovat lähtöisin ihmisestä, ulkoilmasta tai muusta tilan käyttöön liittyvästä toiminnasta. Ilmassa olevat epäpuhtaudet myös vaihtelevat ajallisesti ollen täten aikariippuvaisia. Epäpuhtauksien pitoisuuksien pitämiseksi tarpeeksi matalana ilmanvaihdon toimivuuden merkitys kasvaa. (Seppänen ym. 2004, 20.)

Kuva 15 esittää päästölähteiden sijoittelua toimistohuoneessa. Epäpuhtauslähteinä käytettiin mittauksissa 2-butoksi-etanolia, etyylibentseeniä, 2-etyyli-1-heksanolia, 1-kloorioktaania, tolueenia ja undekaania. Näitä aineita vapautettiin toimiston huoneilmaan erlenmeyer pulloista ja petrimaljoilta. Mallinnuksessa luotiin virtaustilaan pistelähteitä, jotka nostettiin 12 cm annettua pistettä ylemmäksi näiden astioiden kuvaamiseksi. Epäpuhtaudet sekoittuvat ilmaan diffuusion avulla, joten epäpuhtauslähteille annettiin kinemaattinen diffuusiokerroin, joka oli $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Pistelähteiden karteesiset koordinaatit olivat:

2-butoksietanoli: X: 75 cm, Y: 30 cm, Z: 165 cm

etylibentseeni: X: 385 cm, Y: 275 cm, Z: 0 cm

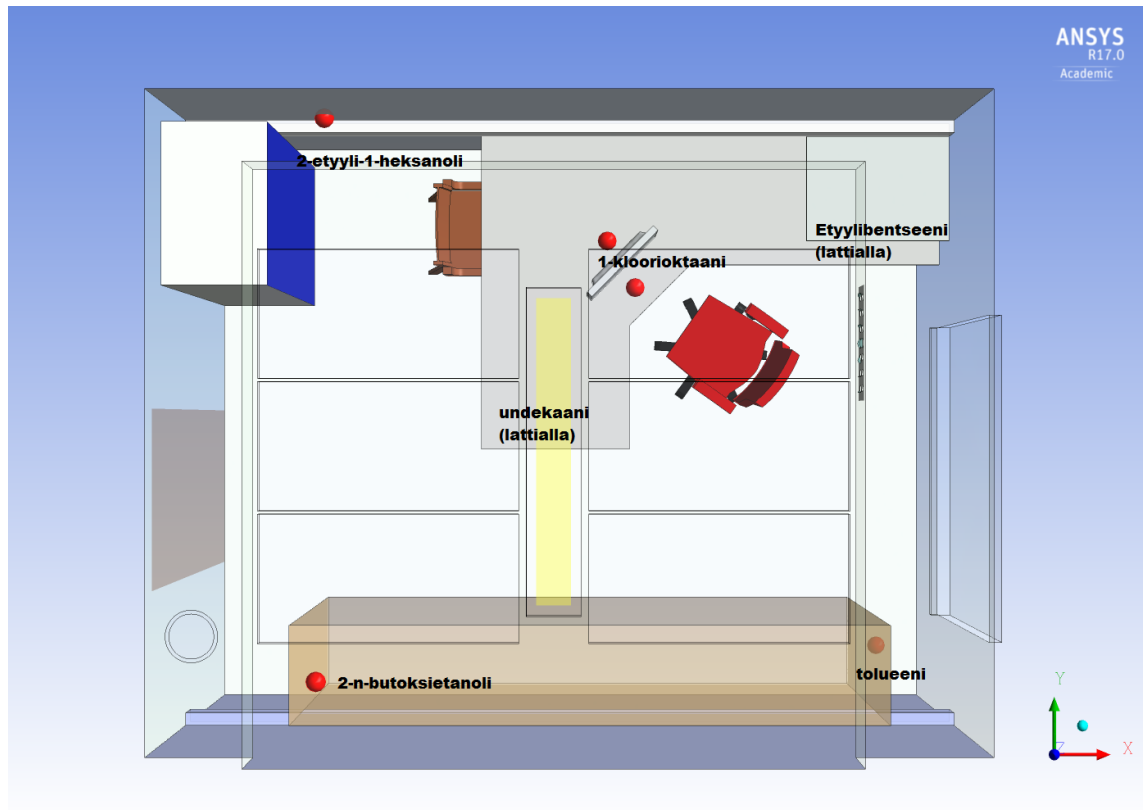
2-etyyli-1-heksanoli: X: 74 cm, Y: 315 cm, Z: 122 cm

1-kloorioktaani: X: 220 cm, Y: 255 cm, Z: 75 cm

undekaani: X: 190 cm, Y: 215 cm, Z: 0 cm

tolueeni: X: 375 cm, Y: 30 cm, Z: 0 cm

Päästöaineet määriteltiin passiivisiksi skalaareiksi ja niille annettiin haihtumisnopeus 10^{-6} kg/s. Annettu haihtumisnopeus ei vastaa oikeaa mutta on helppo skaalata vastaamaan mittauksissa havaittua haihtumisnopeutta.



Kuva 15 Päästölähteet.

4.5 Monitorointipisteet

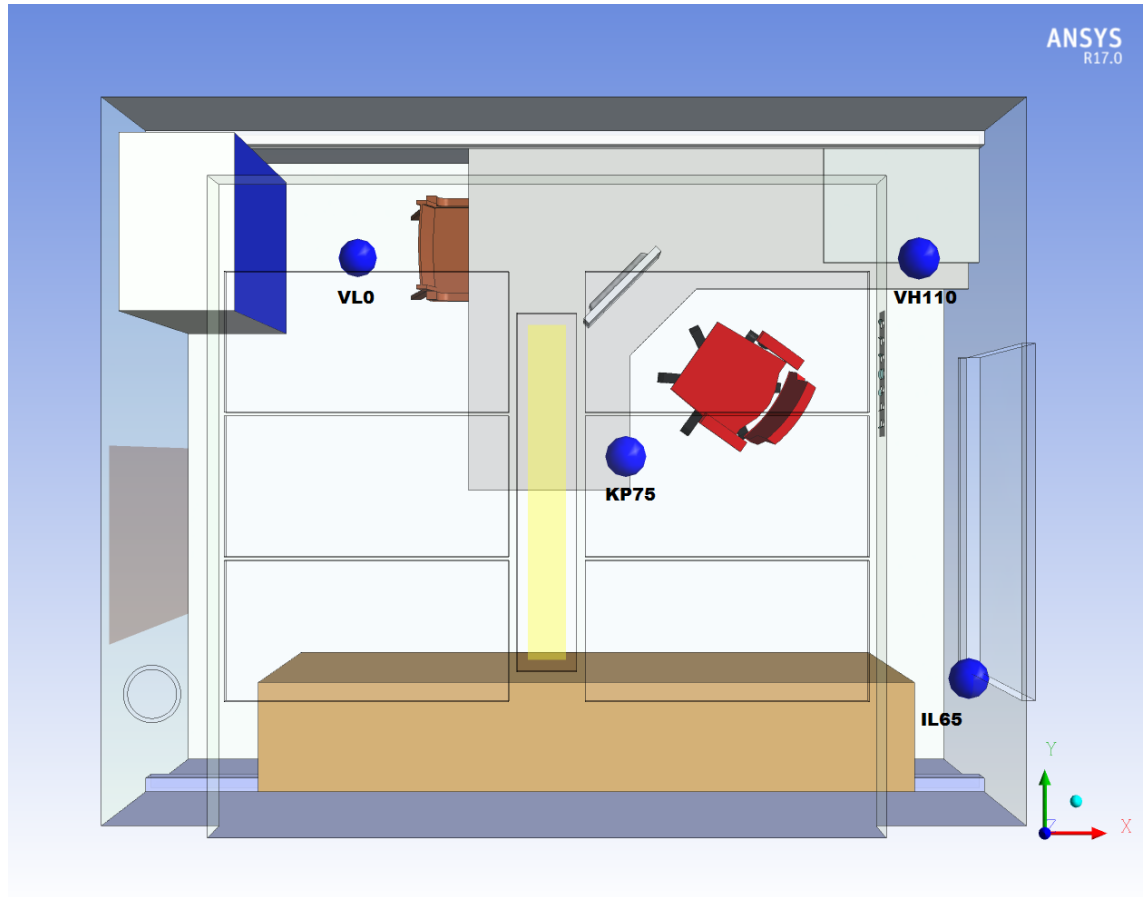
Kuva 16 esittää monitorointipisteiden sijoittelua huoneessa. Monitorointipisteitä oli 4 kappaletta: KP75, VH110, IL65 ja VL0. Monitorointipisteissä seurattiin epäpuhtauksien konsentraatioiden keskiarvoa, virtauskentän nopeuksia sekä painetta. Monitorointipisteet sijoitettiin 2 cm annettua pistettä korkeammalle mittausvälineistön simuloimiseksi. Monitorointipisteiden karteesiset koordinaatit olivat:

KP75: X: 230 cm, Y: 160 cm, Z: 75 cm

VH110: X: 370 cm, Y: 255 cm, Z: 110 cm

IL65: X: 398 cm, Y: 55 cm, Z: 65 cm

VL0: X: 90 cm, Y: 265 cm, Z: 0 cm



Kuva 16 Monitorointipisteet.

4.6 Aikariippuvuus

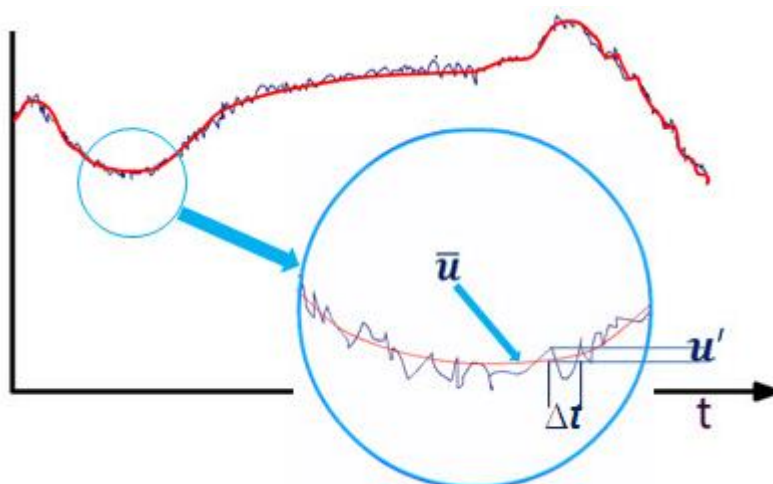
Laskentaohjelma laskee fluidin käyttäytymisen Navier-Stokes-yhtälöiden avulla, joiden mukaan fluidin kiihtyvyys (du/dt) johtuu painegradientista sekä viskoosisen kitkan aiheuttamista voimista. Fluidin kokema kiihtyvyyttä on kahdenlaista: konvektiosta johtuvaa, sekä jokaisen yksittäisen fluidihiukkasen kokema kiihtyvyyttä. Kiihtyvyydestä johtuva aikariippuvuus pitää tavalla tai toisella ottaa laskennassa huomioon. (Kambe 2007, 37; Zikanov 2011, 19.)

Aikariippuvuus otettiin aluksi huomioon RANS-yhtälöillä (Reynolds averaged Navier-Stokes), jotta saatiin yleiskuva virtauksen käyttäytymisestä huoneilmassa. Lopulliset laskennat suoritettiin URANS-yhtälöillä (unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes), jotka näyttivät paremmin epäpuhtauksien konsentraation vaihtelut monitorointipisteissä.

4.6.1 RANS

RANS-yhtälöt ovat Navier-Stokesin liikeyhtälöitä, joissa tyydytään laskemaan nopeuden aikakeskiarvo (kuva 17). Nopeuden aikakeskiarvo saadaan Navier-Stokesin liikeyhtälöstä käyttämällä Reynoldsin erittelymenetelmää (Reynolds decomposition). Kyseisen menetelmän mukaan jokin muuttuja (esimerkiksi hetkellinen nopeus u) voidaan ilmaista aikakeskiarvon (\bar{u}) ja fluktuoivan komponentin (u') summana siten, että yhtälö on muotoa $u = \bar{u} + u'$. Fluktuoivan komponentin aikakeskiarvo on nolla mutta turbulenttisten nopeuskomponenttien tulojen ($-\rho u_i' u_j'$) aikakeskiarvot jäävät. Näitä muuttujia kutsutaan Reynoldsin jännityksiksi ja niiden ratkaisemiseksi tarvitaan turbulenssimalli. (Zikanov 2011, 239-240.)

Koska aikakeskiarvon laskemiseksi yhtälö integroidaan ajan suhteen poistaen resultanttitermien aikariippuvuuden ratkaisu ei varsinaisesti ole aikariippuva, vaan jonkinlainen tasapainotila. Lisäksi RANS yhtälöissä aika-askel ei ole globaali, vaan se valitaan jokaisessa laskentapisteessä tietyn mittaiseksi, jotta vastaus yhtälöön saadaan laskettua mahdollisimman nopeasti. (Learn engineering, 2013.)



Kuva 17 Virtausnopeuden aikakeskiarvottaminen (learn engineering).

4.6.2 URANS

URANS-yhtälöt ovat hyvin samankaltaisia kuin RANS-yhtälöt, sillä erotuksella, että URANS-liikeyhtälöissä on epävakaata aikakomponentti. URANS-yhtälöissä aikakeskiarvo lasketaan sellaiselta aikaväliltä, että nopeat turbulenssivaihtelut häviävät mutta hitaammat vaihtelut, kuten suuret pyörteet ja kentän hitaat heilahtelut säilyvät. URANS-yhtälöissä aika-askel on globaali, eli sama jokaisessa laskentapisteessä. (Salim S. ym. 2011.)

4.7 Lasketut tapaukset

Taulukko 1 esittää lasketut tapaukset. Yhteensä laskettiin 5 eri tapausta. Neljässä ensimmäisessä tapauksessa tutkittiin vain eri asioiden, kuten verkon tarkkuuden ja lämpötehojen vaikutusta laskentaan; varsinaisia tuloksia ei näissä laskennoissa haettu. Lopulliset tulokset, joissa laskettiin päästöjen konsentraatio keskiarvoja, laskettiin 5. tapauksessa.

Taulukko 1 Lasketut tapaukset

Tapaus	Käytetty verkko	Laskentapisteen lkm.	Rajakerroksen sijainti	Rajakerroksen paksuus	Buoyancy (noste, lämpö)
1	1. verkko	1698320	Katto	3,8 cm	ei
2	1. verkko	1698320	Katto	3,8 cm	kyllä
3	2. verkko	1953583	Katto+seinien yläosat	3,8 cm katossa 2,0 cm seinissä	kyllä
4	3. verkko	3076421	Katto+seinien yläosat	3,8 cm katossa 2,0 cm seinissä	kyllä
5	4. verkko	2579108	Katto+seinät+lattia	3,8 cm katossa 2,0 cm seinissä ja lattiasa	ei

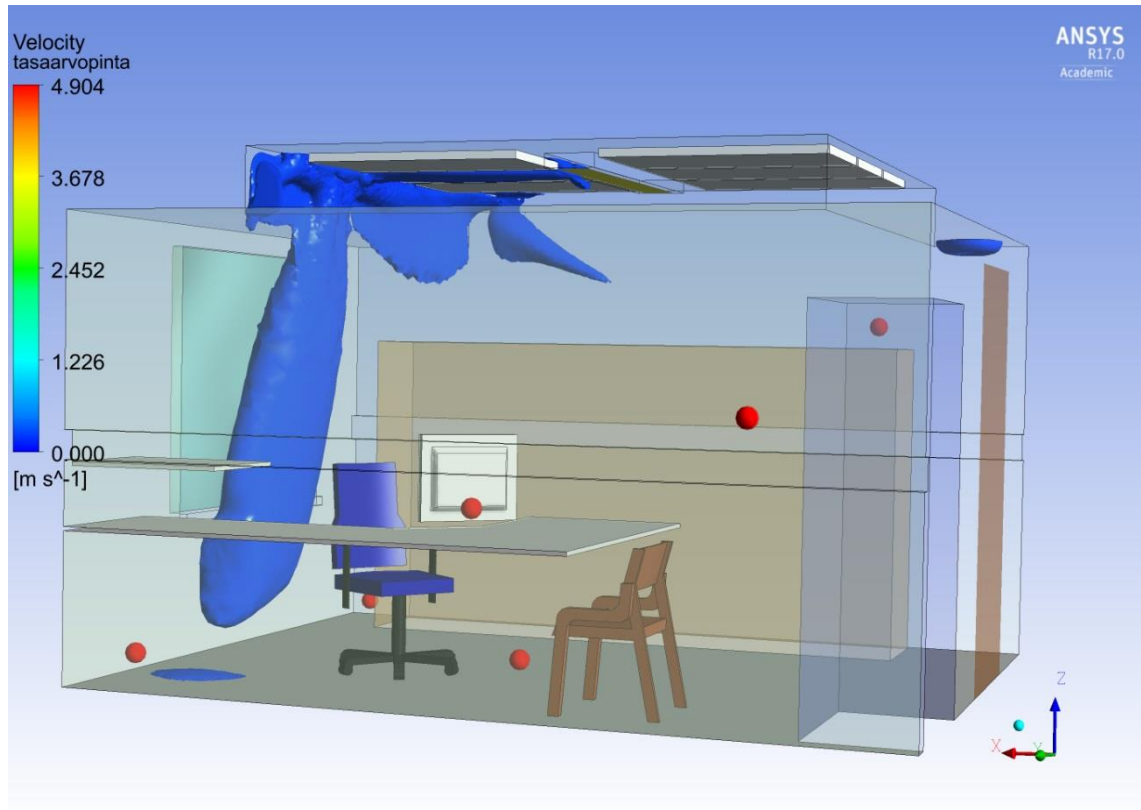
5 TULOKSET

5.1 Suutinasentojen vaikutus

Toimiston kokoisessa tilassa ilmanvaihto on järkevintä suorittaa sekoittavalla ilmanjaolla. Sekoittavan ilmanjaon pyrkimys on sekoittaa puhdas tuloilma mahdollisimman tehokkaasti huoneilmaan. Mahdollisimman tehokkaan sekoittumisen saavuttamiseksi tuloilmalaitteen suuttimien suuntauksella on suuri merkitys. Poistoilmalaitteiden vaikutus ilman sekoituksessa ei ole merkittävä. (Seppänen ym. 2004, 139.)

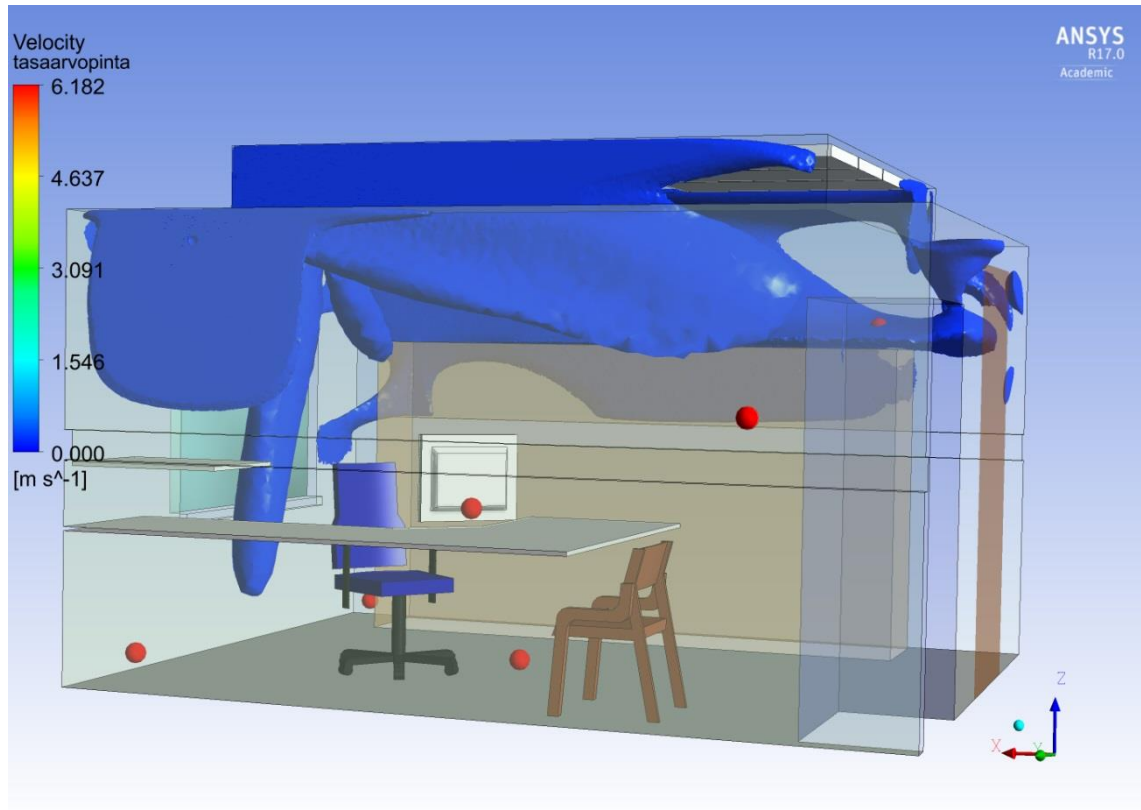
Sekoittuvassa ilmanjaossa tuloilman lähtönopeus on melko suuri (2-10 m/s), ja tuloilma on alilämpöistä. Ilmasuihkun kiinnittymistä kattoon ja seiniin (Coanda-ilmiö) käytetään hyväksi liikeradan hallinnassa. Epäpuhtauslähteiden vaikutukset pyritään poistamaan laimentamalla näiden pitoisuudet alhaiseksi, tosin tulos ei ole paras mahdollinen, jos epäpuhtauslähteet ovat pistemäisiä. (Seppänen ym. 2004, 139.)

Kuvassa 18 on esitetty ilmasuihkun heittokuvio ensimmäisellä suutinasennolla, jossa kaikki suuttimet osoittivat suurin piirtein suoraan ylöspäin. Mallinnuksessa ilmasuihku osui akustiikkalevyjen reunaan ja putosi siitä suoraan alas. Coanda-ilmiötä ei syntynyt, ja tuloilman sekoittuminen huoneilmaan jäi vaillinaiseksi. Ideaalitulanteessa ilmasuihku olisi tarttunut akustiikkalevyjen pintaan ja kulkeutunut niitä pitkin huoneen poikki. Tällä suutinasennolla ei laskettu päästökonsentraatioiden keskiarvoja.



Kuva 18 Ensimmäisen suutinasennon heittokuvio.

Kuvassa 19 on esitetty toisen suutinasennon heittokuvio. Toisessa suutinasennossa, jossa suuttimet suunnattiin seiniä kohti, tapahtuu selkeä Coanda-ilmiö. Tuoreilma sekoittuu tehokkaasti huoneilmaan täten käyttäytyen toivotulla tavalla pienentäen epäpuhtauksien konsentraatioita tehokkaammin kuin ensimmäisen suutinasennon tapauksessa.



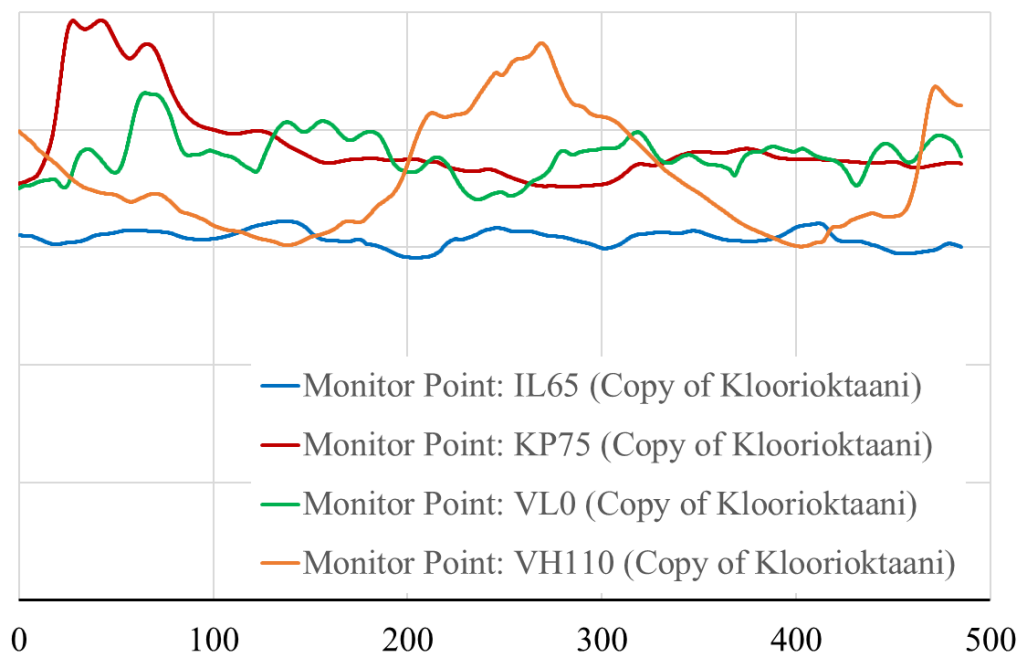
Kuva 19 Toisen suutinasennon heittokuvio.

5.2 Epäpuhtauskonsentraatioiden heilahtelu

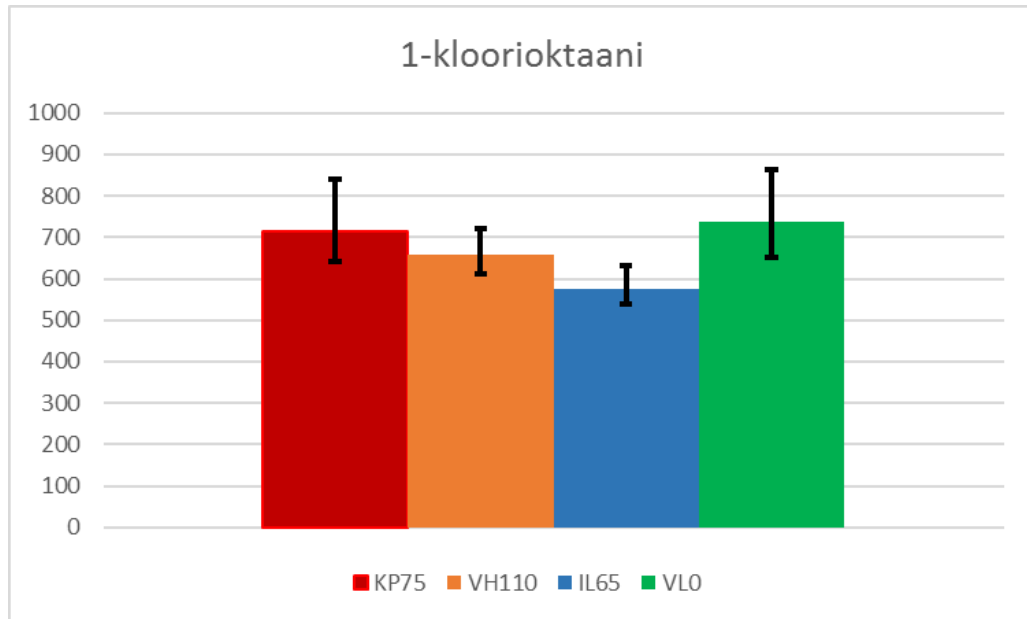
Tulokset epäpuhtauskonsentraatioista on esitetty kuvapareina. Ensimmäisessä kuvassa on esitetty laskennan tulokset viivakaaviona. Jokainen käyrä kuvastaa epäpuhtauden konsentraation vaihtelua ilmoitetussa mittauspisteessä. Vaaka-akselilla on kulunut aika sekunteina. Laskuissa käytettyjen iteraatioiden määrä oli 9669.

Toisessa kuvassa on esitetty koemittauksista saadut epäpuhtauskonsentraatioiden keskiarvot pylväskaaviona. Jokaisella mittauspisteellä on oman värisensä pylväs. Pylväissä on piirretty epäpuhtauskonsentraation vaihteluväli. Pystyakselilla on epäpuhtauden konsentraatio yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty 1-kloorioktaanin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. Päästöjen konsentraatioheilahtelut laskennassa vastaavat melko hyvin todellisia mittauservoja. Mallinnuksessa suurin pitoisuuden heilahtelu on mittauspisteessä VH110, ja oikeissa mittauksissa suurin heilahtelu tapahtui mittauspiste VL0 kohdalla. Vaihtelun suuruus pisteessä VL0 johtuu siitä, että ilmasuihku puhalsi kloorioktaania lähes suoraan mittauspisteen suuntaan.

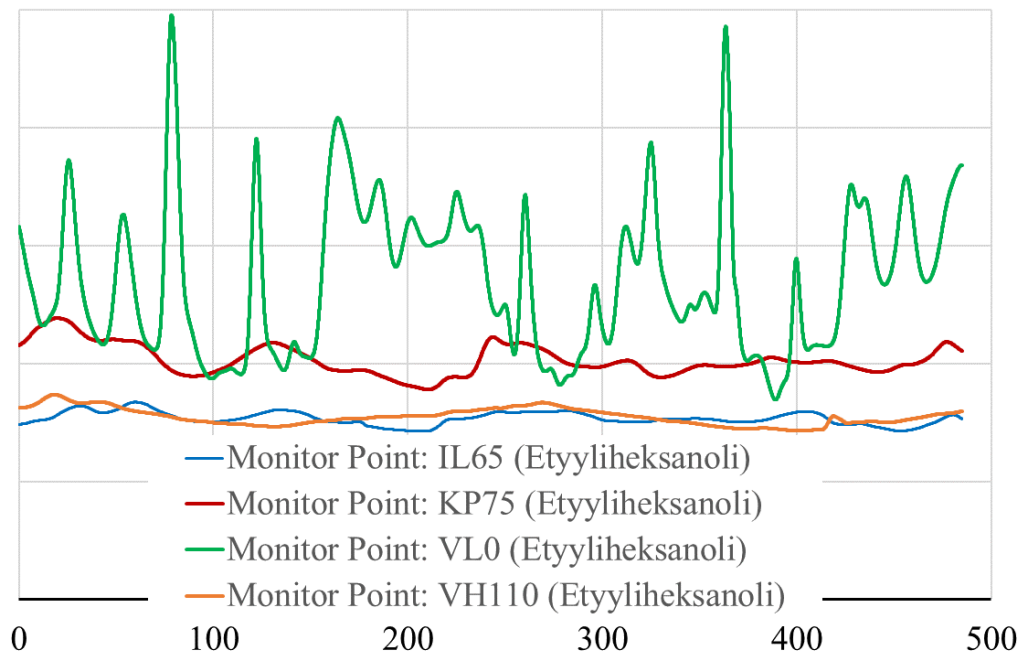


Kuva 20 Kloorioktaanin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.

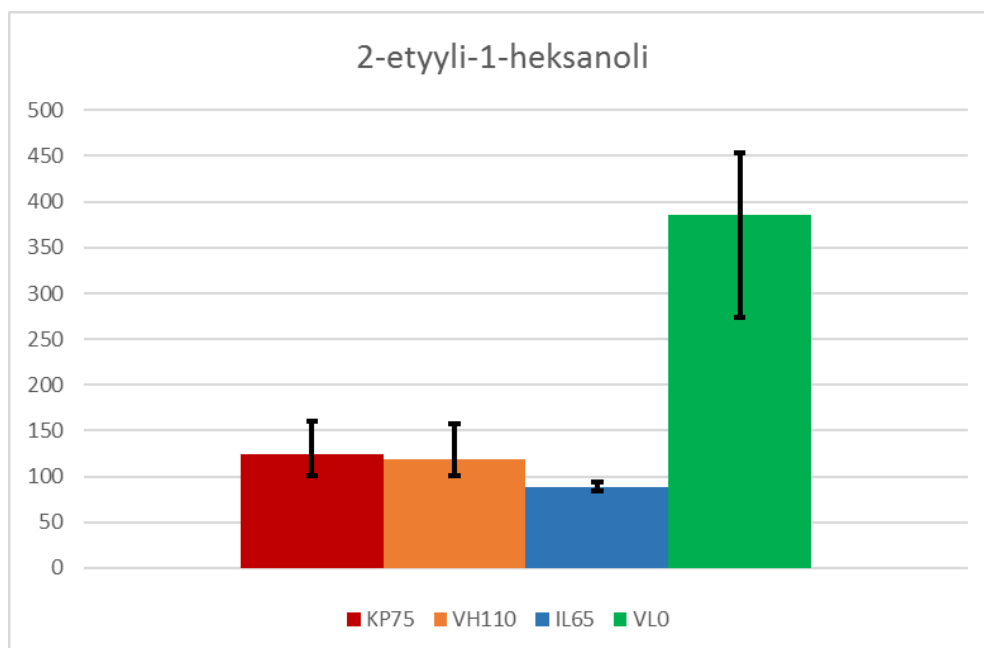


Kuva 21 Klooriooktaanin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

Kuvissa 22 ja 23 on esitetty 2-etyyli-1-heksanolin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. 2-etyyli-1-heksanolin tapauksessa heilahteluiden vastaavuus mallinnuksen ja todellisuuden välillä on erittäin samankaltaista. Suuri pitoisuuden vaihtelu mittauspisteessä VLO johtuu epäpuhtauslähteen ja mittauspisteen välisestä pienestä etäisyydestä sekä ilmavirran vaikutuksesta. Mittauspisteiden IL65 ja VH110 pienet pitoisuudet ja niiden vaihtelut selittyvät sillä, että epäpuhtauslähte on aivan toisella puolella toimistohuonetta mittauspisteisiin nähden ja näiden välissä on paljon virtausesteitä.



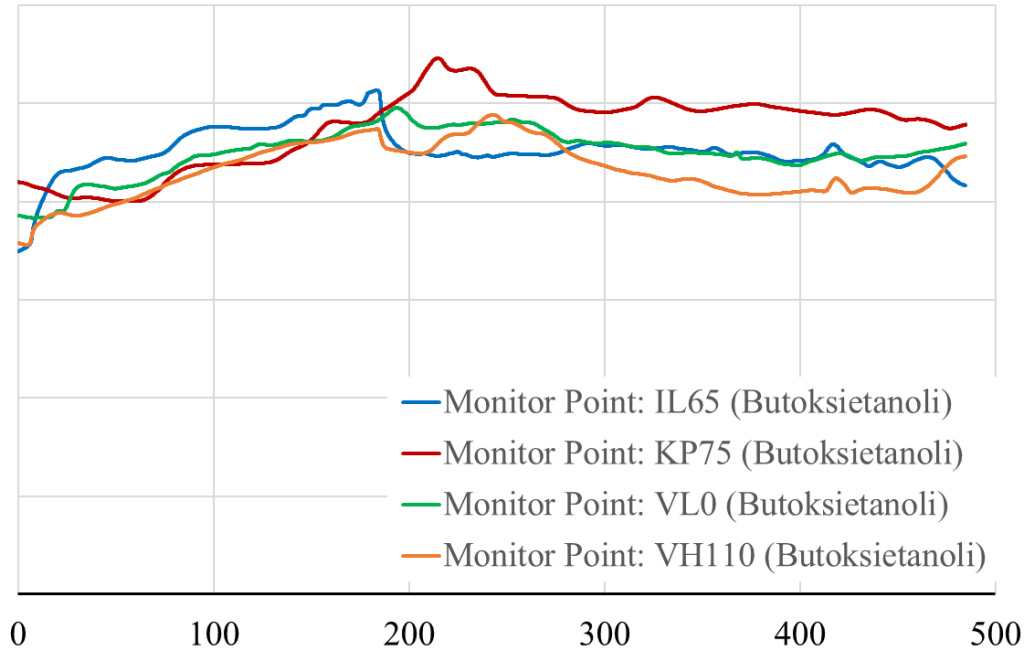
Kuva 22 Etyyliheksanolin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.



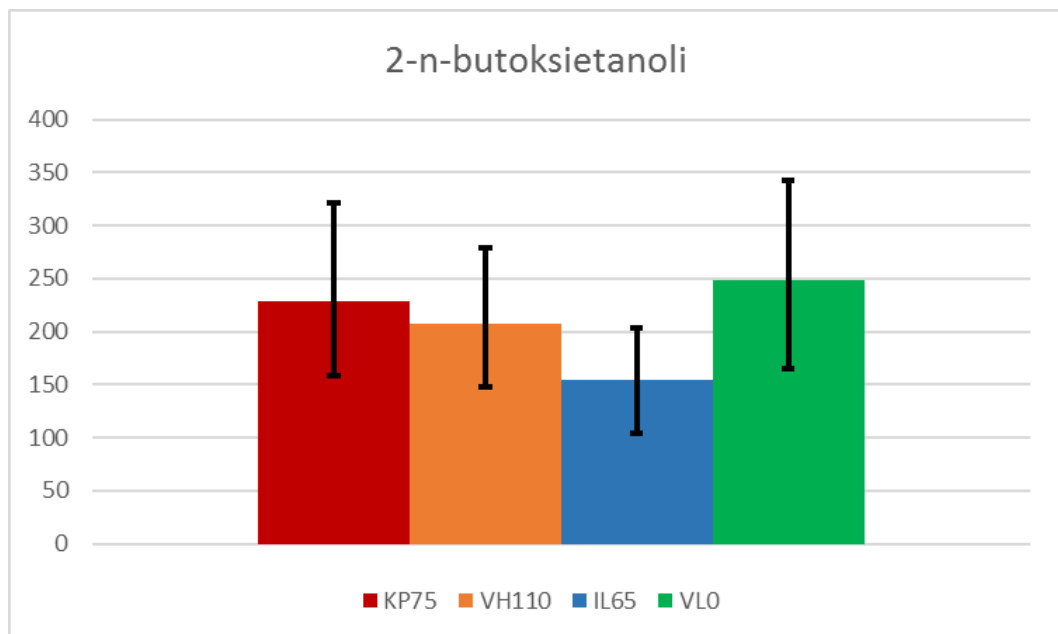
Kuva 23 Etyyliheksanolin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty 2-n-butoksietanolin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. heilahteluiden vastaavuus on huono mittauksen ja mallinnuksen

välillä. Heilahtelut ovat mallinnuksessa paljon pienempiä kuin mittauksissa. Mallinnuksessa konsentraatioiden vähäinen heilahtelu voi johtua epäpuhtauslähteen sijainnista mittauspisteisiin nähden sekä poistoventtiin läheisyydestä.

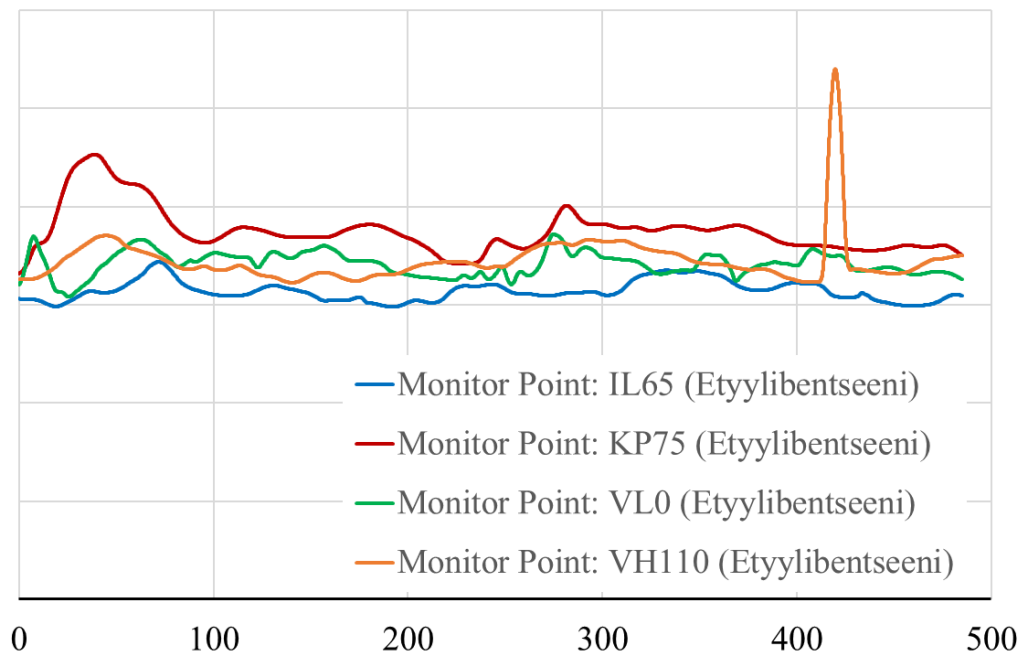


Kuva 24 Butoksietanolin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.

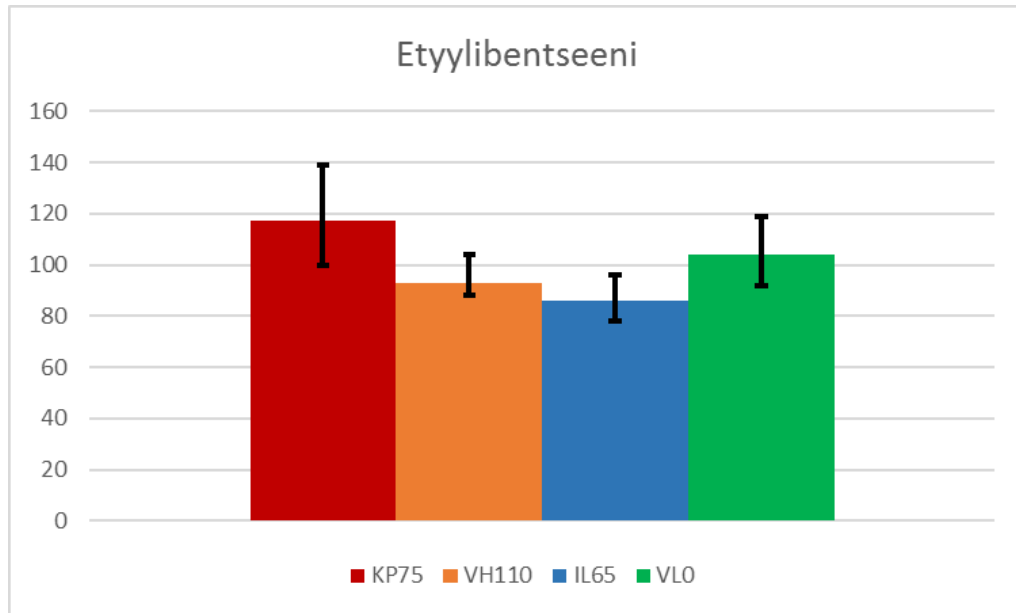


Kuva 25 Butoksietanolin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

Kuvissa 26 ja 27 on esitetty etyylibentseenin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. Mittauksen ja mallinnuksen välinen vastaavuus on todella hyvä. Korkein heilahtelu on sekä mallinnuksessa että mittauksessa pisteessä KP75, mikä johtui ilma-suihkun virtauksesta lattian kautta suoraan huoneen keskelle. Mallinnuksessa on piikki 400 sekunnin jälkeen pisteessä VH110. Tämä piikki johtunee tavasta, jolla virtaus irtosi pöydän reunalta.

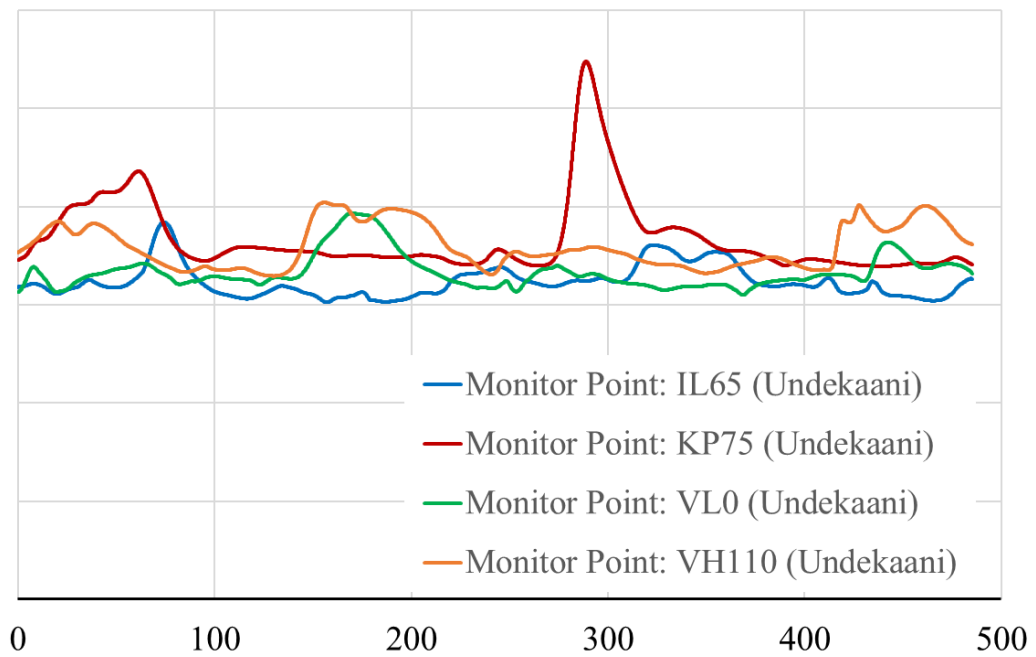


Kuva 26 Etyylibentseenin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.

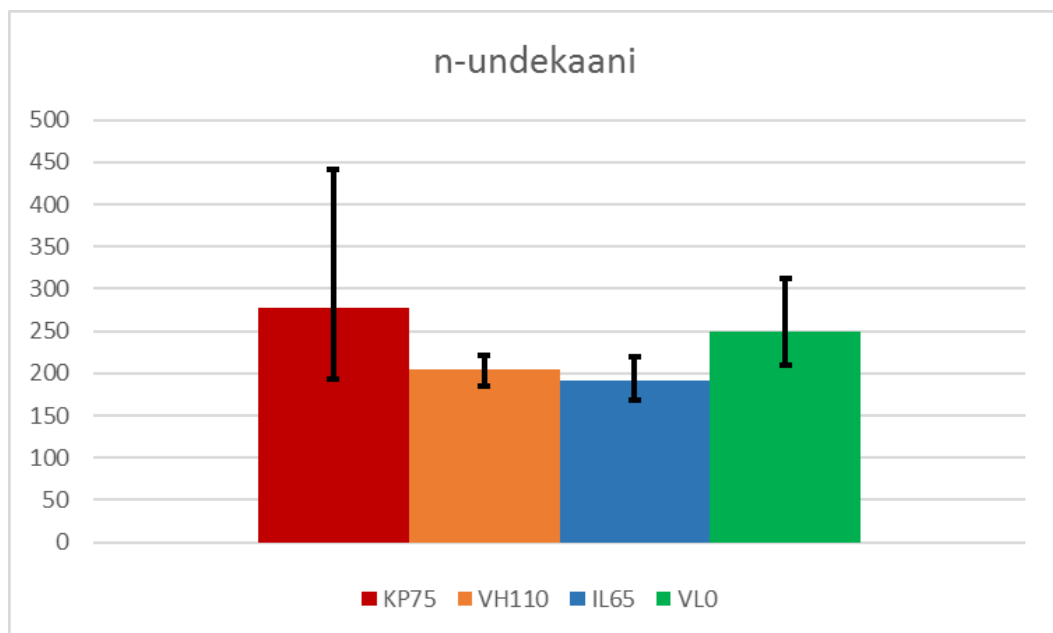


Kuva 27 Etylibentseenin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty n-undekaanin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. Undekaanin heilahtelu mittauspisteissä on hyvin samankaltaista mallinnuksessa ja mittauksissa. Suurin heilahtelu sijoittuu molemmissa pisteeseen KP75 johdettua epäpuhtauslähteen ja mittauspisteen välisestä pienestä etäisyydestä.



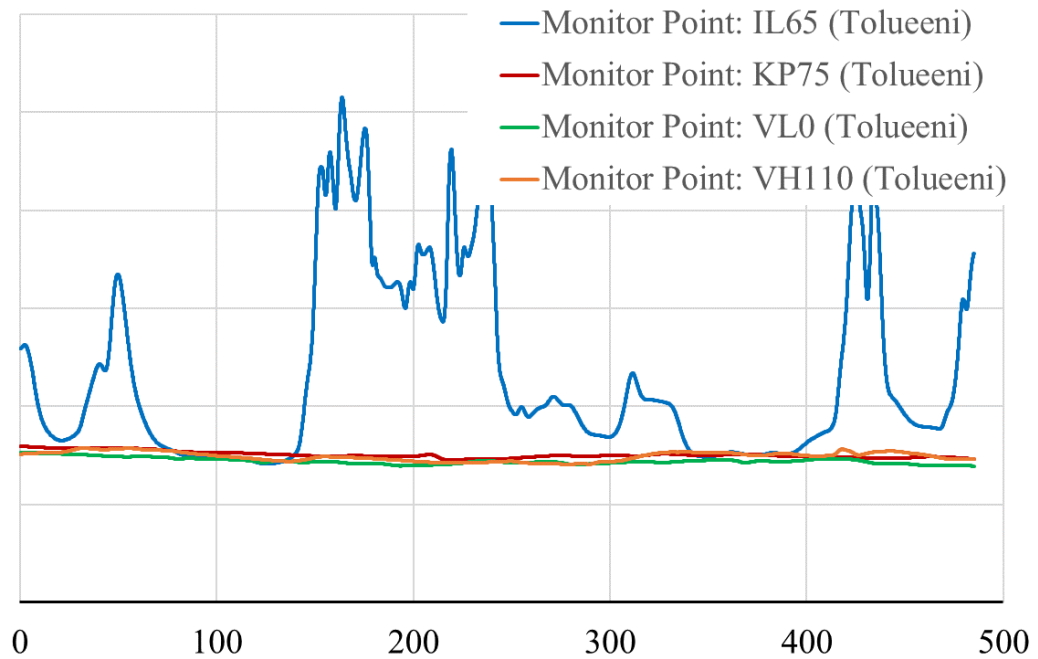
Kuva 28 Undekaaniin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.



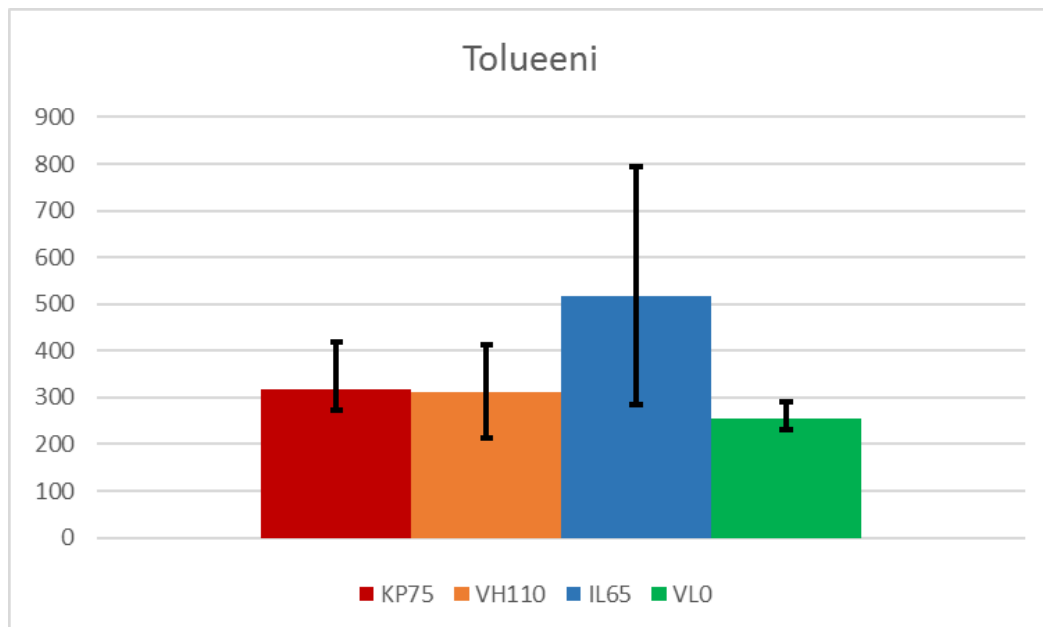
Kuva 29 Undekaaniin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty tolueenin konsentraatioiden vaihtelu mallinnuksessa ja mittauksessa. Mittauksen ja mallinnuksen välinen korrelaatio on hyvä. Muissa pisteissä vaihtelu on verrattain pientä, mutta pisteessä IL65 on erittäin suurta heilahtelua sekä

mallinnuksessa että mittauksessa. Piste IL65 sijaitsee lähes aivan epäpuhtauslähteen yläpuolella.



Kuva 30 Tolueenin konsentraation heilahtelu mallinnuksessa.



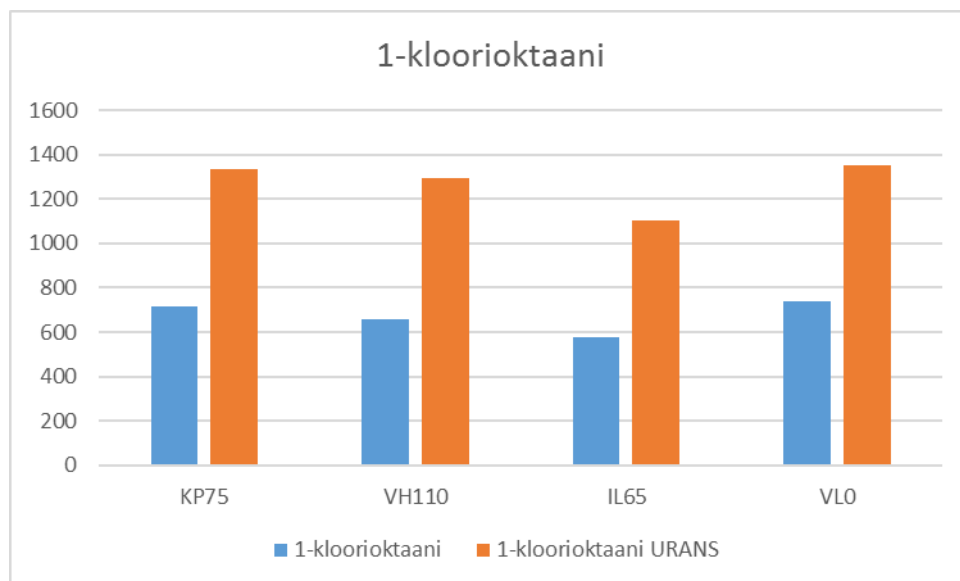
Kuva 31 Tolueenin konsentraation vaihteluväli mittauksissa.

5.3 Epäpuhtauskonsentraatioiden keskiarvot

Epäpuhtauskonsentraatioiden keskiarvot on esitetty pylväskaavioina ainekohtaisesti. Sinisellä värillä maalatut pylväät kuvastavat oikeista mittauksista saatuja konsentraatio keskiarvoja ja oranssilla värillä maalatut pylväät kuvaavat virtauslaskennasta saatuja arvoja. Vaaka-akselilla on ilmoitettu mittauspiste, josta arvot on otettu. Pystyakselilla on epäpuhtauden konsentraatio yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

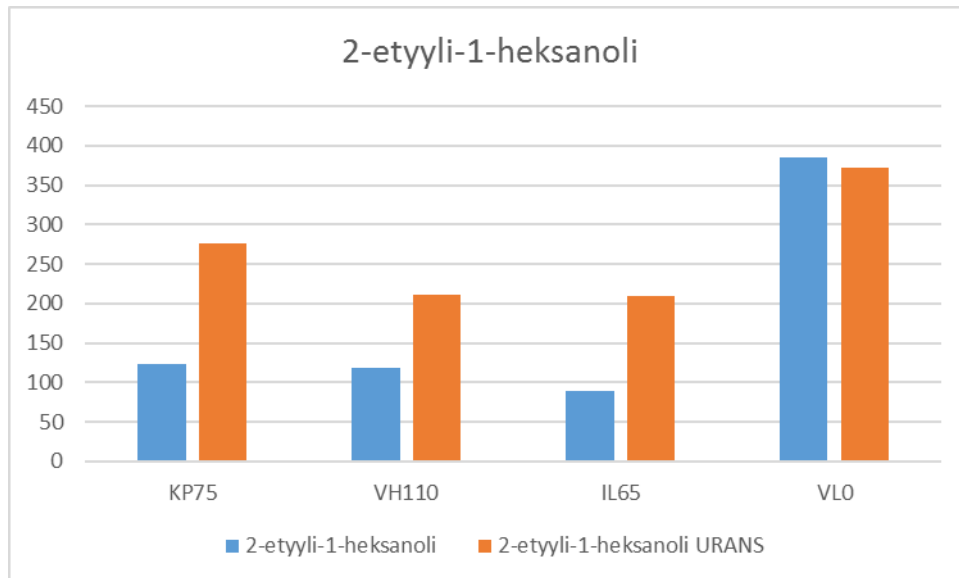
Mallinnuksen ja mittauksen tulokset eivät yhdessäkään pisteessä vastaa täysin toisiaan ja tätä on turha edes olettaa. Epäpuhtauskonsentraatioita ei mittauksissa mitattu suoraan poistokanavasta, vaan poistoventtiilin läheisyydestä. Lisäksi poiston suuruus oli 34,4 l/s kun tulon suuruus oli vain 32,5 l/s, joten tila oli hieman alipaineinen. Tällaisen eron luominen mallinnusohjelmalla on hyvin vaikeaa, koska ei pystytä tarkkaan todentamaan mistä ylimääräinen ilma pakenee ulos. Näiden seikkojen johdosta mittauksista saadut haihtumisnopeudet eroavat jonkin verran todellisuudesta, eikä tuloksia saa vastaamaan toisiaan täysin ilman ekstensiivistä skaalausta.

Kuva 32 esittää 1-kloorioktaanin laskettujen ja mitattujen tulosten vastaavuutta. Pylväiden pituuksien suhteet vastaavat hyvin toisiaan (esimerkiksi mittauksien pienin pitoisuus pisteessä IL65 on myös mallinnuksen pienin pitoisuus). Mallinnuksen ja mitausten välillä on noin 47% ero.



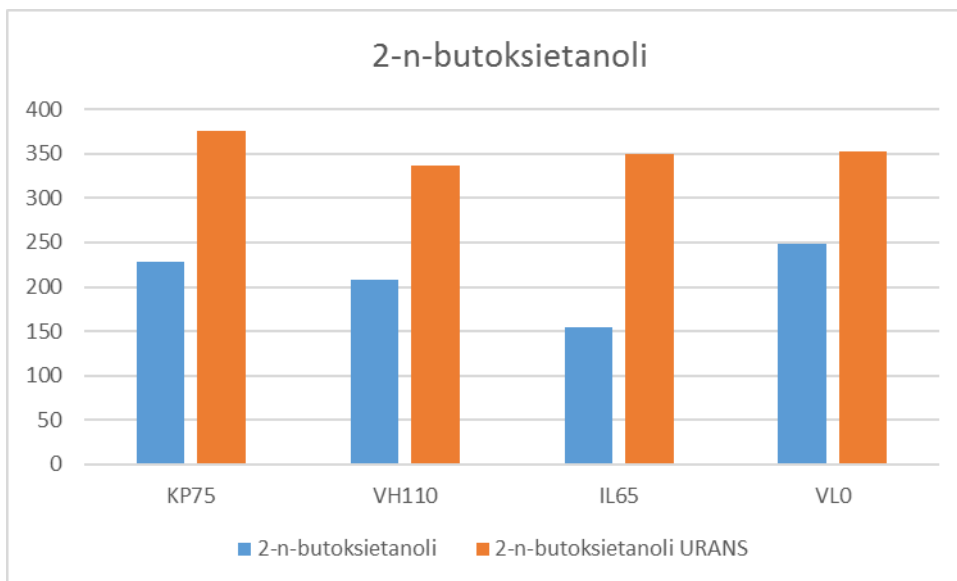
Kuva 32 Kloorioktaanin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

Kuva 33 esittää 2-etyyli-1-heksanolin laskettujen ja mitattujen tulosten vastaavuutta. 2-etyyli-1-heksanolin pitoisuuksien vastaavuus muistuttaa kolmessa mittauspisteessä 1-kloorioktaanin vastaavuutta. Mittauspisteessä VL0 pitoisuudet ovat hyvin lähellä toisiinsa. Pisteissä KP75, VH110 ja IL65 keskimääräinen ero on 52% luokkaa mutta pisteessä VL0 ero on vain 3,4%.



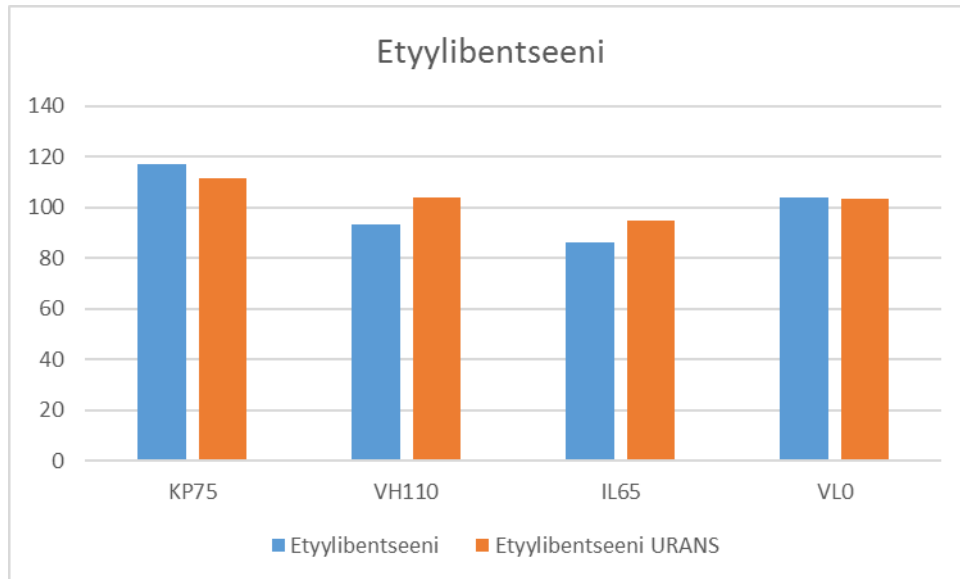
Kuva 33 Etyyliheksanolin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

Kuvasta 34 näemme, että 2-n-butoksietanolin tapauksessa tulosten vastaavuus on hie- man parempi kuin 1-kloorioktaanin tai 2-etyyli-1-heksanolin tapauksessa. Mittauksissa pienimmät pitoisuudet olivat selkeästi mittauspisteessä IL65 mutta mallinnuksessa tämä ei näkynyt. Mittauspisteiden KP75, VH110 ja VL0 keskimääräinen ero mittauksen ja mal- linnuksen välillä on noin 35% ja pisteen IL65 ero on 56%.



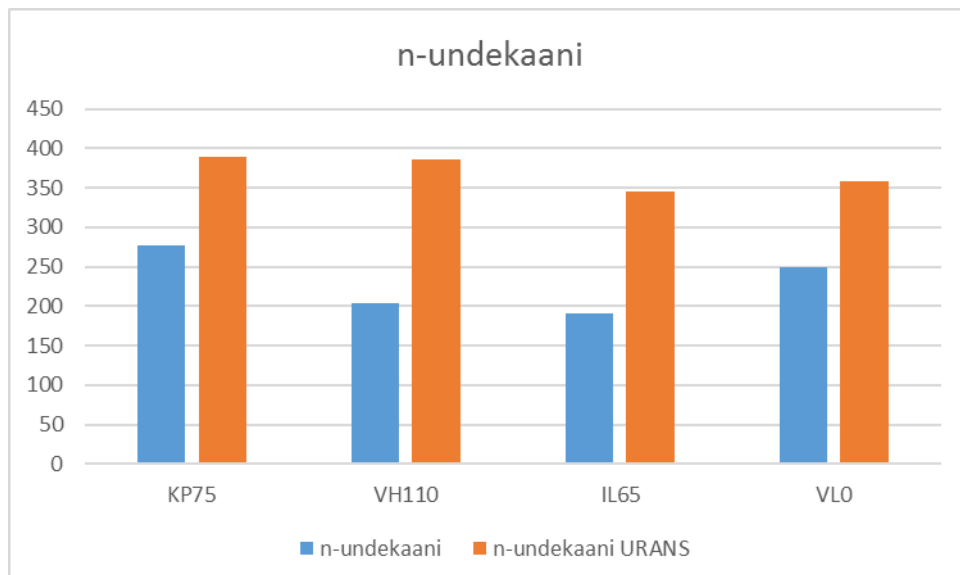
Kuva 34 Butoksietanolin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

Kuva 35 esittää etylibentseenin konsentraatioiden vastaavuutta mittauksien ja mallinnuksen välillä. Päästölähteistä etylibentseenin laskennan tulokset korreloivat kaikista parhaiten todellisten mittausten kanssa. Mittauspisteessä VLO pitoisuudet mittauksen ja mallinnuksen välillä ovat lähes identtiset; ero on vain 0,7 µg. Keskimääräinen ero mittauspisteissä on noin 6,3 %.



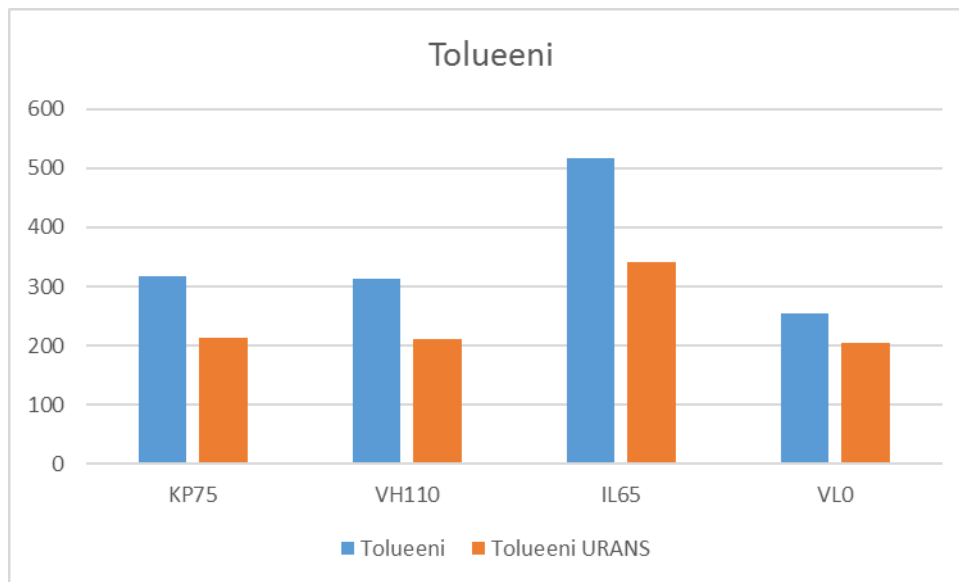
Kuva 35 Etylibentseenin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

Kuva 36 esittää n-undekaaniin tulosten vastaavuutta. Tulokset ovat vastaavuudeltaan samansuuntaisia muiden päästöaineiden kanssa. Mittauksissa pienimmät pitoisuudet olivat mittauspisteessä VH110, ja mallinnuksessa pienimmät pitoisuudet olivat pisteessä IL65. Keskimääräinen ero on noin 38%.



Kuva 36 Undekaaniin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

Kuva 37 esittää tolueenin konsentraatioiden vastaavuutta mittauksien ja mallinnuksen välillä. Tolueenin pylväskaavio ei muistuta vastaavuudeltaan muita päästöjä ollenkaan. Tolueenin tapauksessa mitatut konsentraatiot ovat suurempia kuin laskennasta saadut arvot. Keskimääräinen ero mallinnuksen ja mittausten tulosten välillä on noin 30%.



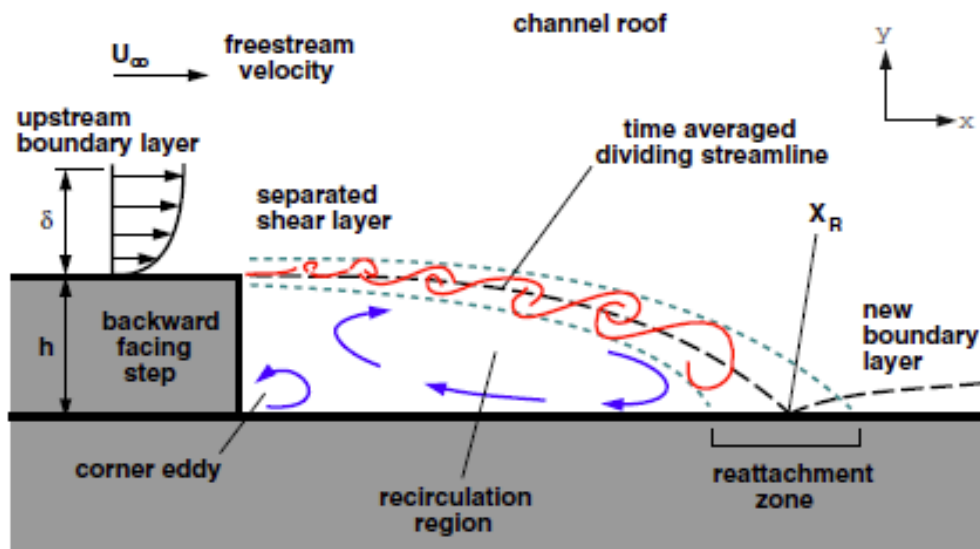
Kuva 37 Tolueenin konsentraatiokeskiarvojen vastaavuus.

5.4 Erot mittauspisteissä

Laskennassa mittauspisteiden sijainnilla oli erittäin suuri vaikutus tuloksien kannalta. Pienimmät virheet laskennoissa olivat pisteessä VL0. Mittauspisteen lähellä on paljon pintoja (komero, tuoli, lattian rajakerrosverkko), joiden koppikoko oli vapaavirtausalueita pienempi aiheuttaen paremman laskutarkkuuden tälle alueelle.

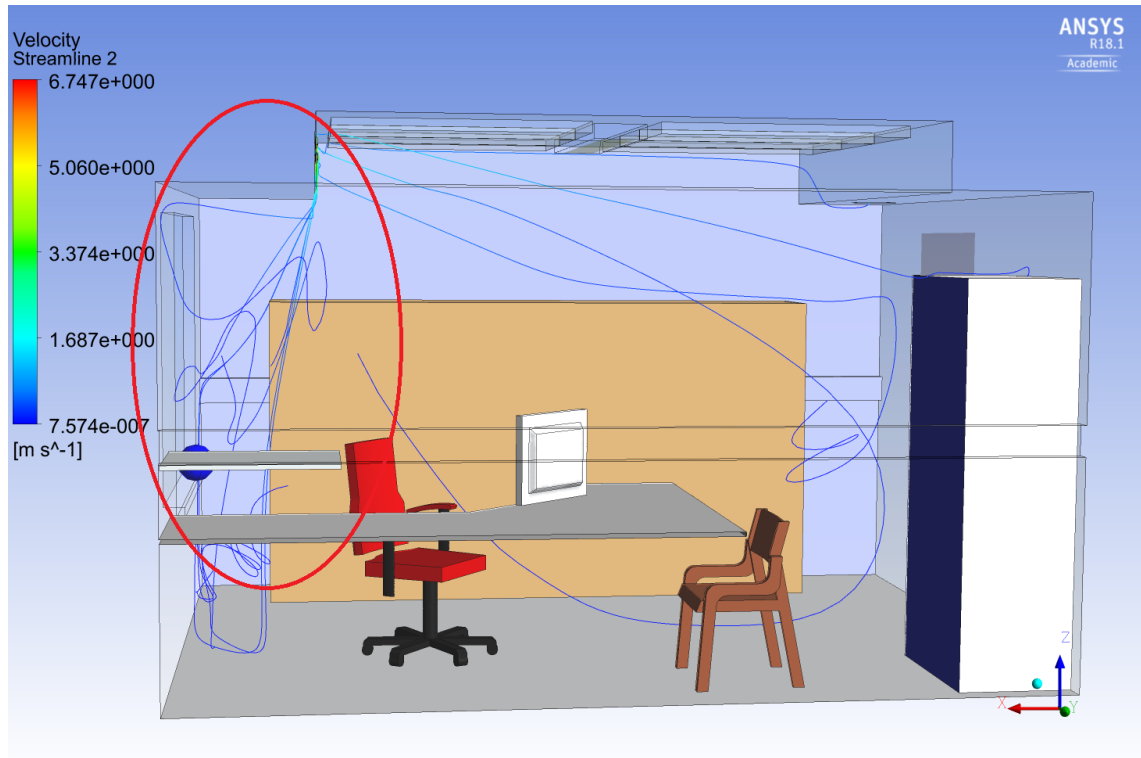
Suurimmat virheet virtausmallinnuksessa sijoittuivat mittauspisteeseen IL65. Ikkunan puoleiselta seinältä puuttui kokonaan rajakerrosverkko, mikä on varmasti osaltaan vaikuttanut tuloksien tarkkuuteen. Mittauspiste myös sijaitsee alueella, johon vaikutti ilmiö nimeltä backstep flow. Kyseisessä ilmiössä virtaus irtautuu geometrian äkkinäisen muutoksen vuoksi ja tarttuu pintaan uudelleen vähän matkan päästä. Irtoamiskohtaan ja uudelleen tarttumisen välille jää alue, jossa turbulenssi on erittäin voimakasta. (Kaul U. K & Walter Frost 1976.)

Kuva 38 esittää portaan yli virtaavan virtauksen yleistä käyttäytymistä. Virtaus tulee kuvassa vasemmalta ja irtoaa portaan pinnasta. Virtauksen lentorata on kuvattu katkoviivalla, ja lattiaan on merkitty uudelleentarttumisalue (reattachment zone). Turbulenttinen alue (recirculation area) on merkitty sinisillä nuolilla.



Kuva 38 Backstep flow -ilmiö (article sapub 2013).

Kuva 39 esittää backstep flow-aluetta toimistohuoneessa. Uudelleentarttumisalue sijaitsee mallissa hieman ennen mittauspistettä. Koska ilmiöön liittyy virtauksen irtautumista ja uudelleen kiinnittymistä ei voida olla täysin varmoja siitä, että mallinnus on todennukainen vaikkakin SST-turbulenssimalli arvioi nämä ilmiöt melko hyvin. (Woelke Michal 2007.)



Kuva 39 Backstep flow toimistohuoneessa.

Muissa mittauspisteissä ero todellisten mittausten ja mallinnuksen välillä oli 35% luokkaa. Tämä johtunee osittain SST-mallin tendenssistä arvioida konsentraatioita hieman yläkanttiin, sekä mallin tavasta ennustaa turbulenssia. Myöskään URANS-yhtälöt eivät kykene ottamaan tarkasti huomioon pienen kokoluokan pyörteitä, jotka ovat tärkeässä osassa päästöjen leviämistä mallinnettaessa. (Salim S. ym. 2011; engineering.com 2016.)

6 LOPUKSI

Lopullinen tavoite luoda toimiva virtauslaskentamalli toimistuhuoneesta voidaan katsoa saavutetuksi. Annetuilla lähtötiedoilla alustettu laskentamalli saavutti samankaltaisia tuloksia kuin todellisissa mittauksissa oltiin saatu.

Tulosten kannalta työ onnistui hyvin. Aikaa opinnäytetyöhön kului paljon, suurimmaksi osaksi laskennan hitauden vuoksi. Ensimmäisen kuukauden edistystä tapahtui nopeasti mutta laskentavaiheen alkaessa vauhti hidastui merkittävästi. Erityisesti ongelmia tuotti ohjelman kaatuminen kesken laskennan, jolloin ohjelman piti aloittaa iterointi tuoreimmasta mahdollisesta tallennetusta tilasta, mikäli tällainen oli olemassa. Työtä ohjanneet tutkijat pitivät virtausmallia onnistuneena ja saivat tuloksia omiin raportteihinsa.

Seuraava vaihe olisi kehittää mallia tarkemmaksi. Tämä tapahtuisi esimerkiksi parantamalla rajakerrosverkkoa, tihentämällä verkkoa, lisäämällä malliin termodynaamiset ominaisuudet (noste ja lämmön kulkeutuminen) ja vaihtamalla turbulenssimallin LES-laskennaksi (large eddy simulation). Ilman näitä toimenpiteitä mallia ei saa tarkemmaksi.

LÄHTEET

k-omega model 2011. CFD-online. Viitattu 15.3.2017 https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model.

Yplus 2014. CFD-online. Viitattu 20.3.2017 [https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_\(y_plus\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus)).

Linear eddy viscosity models 2011. CFD-online. Viitattu 17.4.2017 https://www.cfd-online.com/Wiki/Linear_eddy_viscosity_models.

Two equation models 2016. CFD-online. Viitattu 17.4.2017 https://www.cfd-online.com/Wiki/Two_equation_turbulence_models.

Boundary layer 2013. Computational fluid dynamics. Viitattu 11.9.2017 <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-turbulence-part-4-reviewing-how-well-you-have-resolved-the-boundary-layer/>.

Wall functions and yplus 2012. Computational fluid dynamics. Viitattu 26.4.2017 <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-turbulence-wall-functions-and-y-requirements/>.

Turbulence model 2013. Comsol. Viitattu 23.4.2017 <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.

Choosing the right turbulence model 2016. Engineering. Viitattu 11.9.2017 <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>.

Kaul U. K.; Walter Frost. Turbulent atmospheric flow over a backward facing step s. 19, 21 Viitattu 10.9.2017. Saatavilla sähköisenä osoitteessa <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770005696.pdf>.

Boundary layer and wall function in turbulent flows 2017. Learncax. Viitattu 9.10.2017 <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows>.

CFD RANS 2013. Learnengineering. Viitattu 23.4.2017 <http://www.learnengineering.org/2013/05/computational-fluid-dynamics-rans-fvm.html>.

Menter F. R.; Kuntz M.; Langtry R. Ten Years of Industrial Experience With The SST Turbulence Model s. 3 Viitattu 9.10.2017. Saatavilla sähköisenä osoitteessa https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/doc/2003_Menter,%20Kuntz,%20Langtry_Ten%20years%20of%20industrial%20experience%20with%20the%20SST%20turbulence%20model.pdf.

Nakayama Y & Boucher R. 1999. Introduction to fluid dynamics. Lontoo: Arnold

Oleg Zikanov. 2011. Essential computational fluid dynamics. John Wiley & Sons, Incorporated
Salim S. M.; Ong K. C.; Cheah S. C. Comparison of RANS, URANS and LES in the Prediction of
Airflow and Pollutant Dispersion Viitattu 10.5.2017. Saatavilla sähköisenä osoitteessa
http://www.iaeng.org/publication/WCECS2011/WCECS2011_pp673-678.pdf.

Schlichting H & Gersten K. 2000. Boundary-layer theory. Berliini: Springer

Seppänen O.; Hausen A.; Hyvärinen K. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa: Forssan kirjapaino Oy

Tsutomu Kambe. 2007. Elementary fluid dynamics. Lontoo: World Scientific Publishing Company

CFX theory guide 2011. Concordia. Viitattu 9.10.2017 http://users.encs.concordia.ca/home/m/m_mamu/ANSYS%20CFX%20documentation/cfx_thry.pdf.

Woelke Michal. Eddy viscosity turbulence models employed by computational fluid dynamic s. 3,
Viitattu 11.9.2017. Saatavilla sähköisenä osoitteessa
http://ilot.edu.pl/prace_ilot/public/PDF/spis_zeszytow/191_2007/07_Woelke.pdf.

KUVALÄHTEET

Kuva 17. viitattu 13.9.2017. Saatavissa:
<http://www.learnengineering.org/2013/05/computational-fluid-dynamics-rans-fvm.html>

Kuva 38. viitattu 13.9.2017. Saatavissa: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ajfd.20130302.01.html>

Päästökeskiarvojen laskentataulukot



lasketut-mitatut.xls

x