

Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka, Liisa Lindberg & Matti Kokkala

Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi

$$dU = TdS - PdV$$

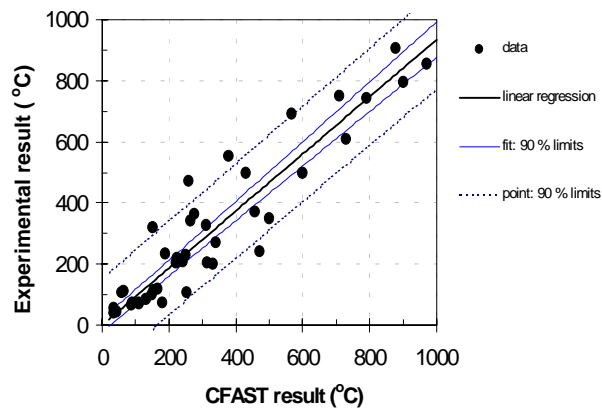
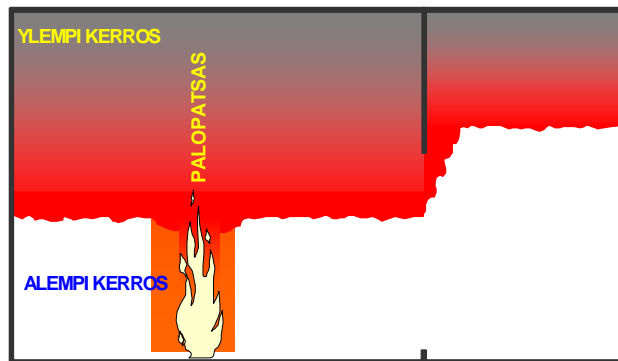
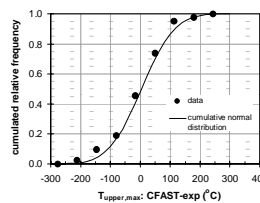
$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$$

$$\dot{h}_i = \frac{dE_i}{dt} + P \frac{dV_i}{dt}$$

$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{gDD^2}}$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U + V_U \frac{dP}{dt} \right] - \frac{x_{CFAST} - \bar{x}_{mitattu} \pm t_{1-\alpha/2} (N_1 + N_2 - 2) \cdot s_e \cdot \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}}$$

$$\frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}_c} = 0.026 \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{0.909}$$



Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi

Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka, Liisa Lindberg &
Matti Kokkala

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5664-5 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5665-8 (URL:<http://www.inf.vtt.fi/pdf>)

ISSN 1455-0865 (URL:<http://www.inf.vtt.fi/pdf>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4815

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Stenkarlsvägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4815

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4815

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, fastighets- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2000

Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti. Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi [Assessment of validity of the zone model program CFAST]. Espoo 2000, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2027. 51 s. + liitt. 14 s.

Avainsanat computer programs, fire safety, CFAST, zone models, assessment, evaluation, documentation, validity, mathematical models

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkasteltiin vyöhykemalliohjelman CFAST tulosten pätevyyttä ja ohjelmiston dokumentointia tarkoituksena arvioida ohjelman soveltuvuutta insinöörityökaluksi. Arviointi perustuu ohjelmiston dokumentteihin, ohjelmiston arviointia käsitteleviin artikkeleihin, jotka ovat ilmestyneet referoiduissa tieteellisissä julkaisuissa, sekä VTT:n omiin aiempiin arviointeihin.

CFAST-ohjelmisto on kehitetty NIST:ssä (National Institute of Standards and Technology, USA), josta se on vapaasti saatavissa. Malli on laajassa käytössä ja siitä on runsaasti julkaisuja. Sen dokumentit ovat kattavia ja sisältävät myös mallin kelpoisuuden arviointia.

Mallin pätevyysaluetta rajoittavat yleiset vyöhykemalleihin liittyvät tekijät. Kokeellisen palopatsasmallin pätevyysalue voi rajoittaa laskennan pätevyyttä kohteena olevan tilan korkeuden kasvaessa. Horisontaalisessa suunnassa suurten tilojen mallintamista vaikeuttaa vyöhykemallin oletus suureiden vakioisuudesta vaakasuorassa suunnassa. Myös voimakkaasti turbulentit tilanteet voivat olla soveltumattomia vyöhykemalleilla simuloitaviksi.

Tutkimuksen lähteinä käytetyissä julkaisuissa CFAST-mallia pidetään yleisesti ottaen käyttökelpoisena työvälineenä. Lähinnä suurten tilojen palojen laskennassa ohjelmiston kelpoisuuden osoittamiseen katsottiin tarvittavan vielä lisää kokeellista vertailumateriaalia.

Kvantitatiivinen vertailu CFAST-ohjelman tulosten ja kokeellisten tulosten välillä osoitti, että CFAST-ohjelman tulokset ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötilasta ja ajasta, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu tasolle 1,5 m, vastaavat varsin hyvin koe-tuloksia. CFAST-ohjelmalla lasketut ajat, joissa ylemmän vyöhykkeen lämpötila nousee 100 °C:seen tai 300 °C:seen, olivat lähes poikkeuksetta lyhyempiä kuin mitatut ajat (turvallinen ennuste). Savupatjan paksuuden CFAST-ohjelma laski pienemmäksi kuin mitatut arvot (turvaton ennuste). Kaasupitoisuuksissa CFAST-tulosten jakautuminen mittaustulosten suhteen oli varsin satunnaista.

Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti. Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi [Assessment of validity of the zone model program CFAST]. Espoo 2000, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2027. 51 p. + app. 14 p.

Keywords computer programs, fire safety, CFAST, zone models, assessment, evaluation, documentation, validity, mathematical models

Abstract

In this study we have examined the validity of the results of the CFAST zone model program and evaluated its documentation in order to assess the suitability of the program to a fire-safety engineering tool. The material used in the study comprises the program documentation, articles published in international refereed journals addressing the assessment of the validity of the program and previous assessments by VTT.

CFAST program has been developed at NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) where it can be obtained free of charge. The program is used world wide and literature on it is ample. Its documentation is comprehensive and include also assessment of its validity.

The validity of the program is limited by factors associated with the applicability of zone models in general. The limits of validity of the empirical fire plume models constituting an essential part of zone models may restrict the applicability of the program in very high atria. Simulation of fires in spaces with large horizontal extent may be hampered by the assumption of homogeneity of quantities in the horizontal direction, inherent in zone models. Also simulation of vigorously turbulent conditions may be beyond the capability of zone models. In the articles used in this study, CFAST program is considered in general as an adequate tool for fire safety calculations. It is mainly in the case of simulation of fires in large spaces that the demonstration of the validity of the program is considered insufficient, requiring more experimental material to compare the program results with.

From the quantitative comparison of the CFAST results with experimental data, the following findings emerged: CFAST results agreed well with the measured values for the upper zone maximum temperature and the time it takes for the upper and lower layer interface to descend to the level of 1,5 m. In most cases examined, the times for the upper zone temperature to reach 100 °C and 300 °C predicted by the CFAST program were shorter than the times observed in the experiments (a prediction on the safe side). Frequently, the calculated thickness of the upper zone was smaller than the experimental one (a prediction on the unsafe side). Comparison of the experimentally observed gas species concentrations with those calculated by CFAST reveals large and rather random scatter.

Alkusanat

Tämä julkaisu kuuluu osana VTT Rakennustekniikassa vuosina 1996–2000 toteutettavaan Palotutkimusraati ry:n aloitteesta käynnistettyyn kansalliseen tutkimusohjelmaan TOIMINNALLISTEN PALOSÄÄDÖSTEN TEKNISET PERUSTEET (TOPA-projekti). Tutkimusohjelman tavoitteena on kehittää Suomen olosuhteisiin soveltuvat menetelmät ja menettelytavat käyttäjille tarkoitettuine ohjeineen, jotta toiminnalliset palosäädökset voitaisiin ottaa hallitusti käyttöön viimeistään vuoden 2001 alussa.

Tutkimusohjelma koostuu kahdeksasta yllä mainittua tavoitetta tukevasta osaprojektista:

- A0: Toiminnallisen paloturvallisuusarvioinnin yleiset perusteet
- A1: Mitoituspalo; palon syttyminen ja kehittyminen
- A2: Savun leviäminen
- A3: Palon leviäminen; rakenteiden palonkestävyys
- A4: Palonilmaisuus ja -sammuus
- A5: Poistuminen ja pelastaminen
- A6: Palokunnan toimintaedellytykset
- A7: Sovellutusesimerkit ja kustannusvaikutukset.

Tutkimusohjelmaa rahoittavat Palotutkimusraati ry, Palosuojelurahasto, ympäristöministeriö, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Suomen Puututkimus Oy, Teräsrakenneyhdistys ry, Suomen Muoviteollisuusliitto ry sekä VTT Rakennustekniikka.

Tässä julkaisussa arvioidaan amerikkalaisen vapaasti saatavilla olevan CFAST simulointiohjelman soveltuvuutta paloturvallisuussuunnittelussa käytettäväksi insinööri työkaluksi. Julkaisu on ensimmäinen, jossa esitellään osaprojektin A0 tuloksia, ja se liittyy TOPA-projektin tavoitteeseen kehittää todennettuja laskentamenetelmiä toiminnallisen suunnittelun luotettavuuden takaamiseksi.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	8
2. Palopatsasmallit	10
2.1 Yleistä	10
2.2 Rajoituksia	10
2.2.1 Palon voimakkuuden arviointi	10
2.2.1.1 Laaduton paloteho	11
2.2.1.2 Frouden luku	11
2.2.1.3 Liekin korkeus	13
2.2.2 Palopatsaan nousukorkeus	13
2.2.3 Huonetilan vähimmäisleveys	14
3. Vyöhykemallit	16
3.1 Yleistä	16
3.2 CFAST-ohjelmiston kaksivyöhykemalli	17
4. CFAST-ohjelmassa käytetyt matemaattiset mallit ja laskenta	19
4.1 Perusyhtälöt	19
4.2 Alimallit	21
4.2.1 Virtaus palopatsaassa: McCaffreyn palopatsasmalli	22
4.2.2 Virtaus aukoissa	22
4.3 Numeeriset menetelmät	23
4.4 Ohjelmiston rajoitukset	23
5. Mallin kelpoisuuden tarkastelu	25
5.1 Simulointimallien vertailu	25
5.1.1 Palopatsasmallit	25
5.1.2 Huonetilojen mallintaminen	25
5.1.3 Laskentaohjelmien vertailu	26
5.2 Kokeellinen todentaminen	28
5.2.1 Vertailuaineisto	29
5.2.2 Vertailutuloksia	33
5.2.3 Vertailutulosten arviointi	38
5.2.4 Laskettujen ja kokeellisten tulosten vastaavuudesta	40

6. CFAST-ohjelman dokumentointi	43
6.1 Mallin tekniset perusteet	43
6.2 Käyttäjän opas	43
7. Yhteenveto	45
7.1 Fysikaalisiin alimalleihin liittyvät kelpoisuuden rajat	45
7.2 Ohjelman tulosten ja koetulosten vertailu	46
7.3 Esimerkkejä asiantuntija-arvioon perustuvista ohjeista	47
Lähdeluettelo	48

LIITTEET

Liite1: Vertailuaineisto ja siitä johdettuja lukuja

Liite 2: Poikkeavat havainnot, esimerkki

Liite 3: Suhteellisten erotusten tarkastelu

Liite 4: CFAST-tulosten ja mittaustulosten erojen tilastollinen tarkastelu

Liite 5: Kahden palopatsasmallin vertailua

1. Johdanto

Toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun edellytyksenä on, että käytettävissä on suunnittelutyöhön soveltuviksi osoitettuja laskentaohjelmia ja että niitä käyttävät vain pätevät suunnittelijat, jotka tuntevat ohjelmat ja niiden taustalla olevat mallit riittävän hyvin. Erityisen tärkeitä vaatimukset ovat palon kehittymistä ja savun kulkeutumista kuvaavien ohjelmistojen yhteydessä, koska niillä saatavat tulokset riippuvat kymmenistä parametreista, joille annettavia arvoja käyttäjät pystyvät muuttamaan.

Yleisimmin kehittyneessä suunnittelussa käytetään vyöhykemalleja, jotka soveltuvat tunnetun palolähteen aiheuttamien lämpötilojen ja savun kulkeutumisen arviointiin. Vyöhykemallien etuna parempaan erotuskykyyn pystyviin kentämalleihin verrattuna on helppokäyttöisyys ja nopeus sekä lähtötietojen määrittelyssä että laskennassa. Eri tutkimuslaitokset ja insinööritoimistot ovat laatineet kymmenittäin vyöhykemalli-ohjelmistoja, jotka kuitenkin periaatteellisesti ovat hyvin lähellä toisiaan [Friedman 1992]. Yhdysvalloissa National Institute of Standards and Technologyssa kehitetty CFAST-ohjelma on näistä tunnetuin, yleisimmin käytetty ja parhaiten tieteellisessä kirjallisuudessa arvioitu ohjelma. Se on saatavissa vapaasti edellä mainitusta tutkimuslaitoksesta esim. Internetin kautta.

Tässä julkaisussa esitettävän kelpoisuuden arvioinnin ohjeena on käytetty ISO/TC92/SC4:n työryhmässä laadittu teknillinen raportti palonkehittymistä kuvaavien ohjelmistojen kelpoisuuden arvioinnista[†] [ISO/TR 13387 1999]. Ohjeen mukaisesti, arviointi perustuu ohjelmiston dokumentteihin ja ohjelmiston todentamista käsitteleviin artikkeleihin, jotka ovat ilmestyneet referoiduissa tieteellisissä julkaisuissa, sekä VTT:n omiin aiempiin arviointeihin. Laskenta- ja koetuloksia on vertailtu myös useissa eri tutkimuslaitosten raporteissa, mutta koska niiden laatua ja tulosten oikeellisuutta ei ole tarkastettu samalla tavalla kuin tieteellisten artikkeleiden, niistä saatua informaatiota on käytetty vain omien johtopäätöstemme tukena.

[†] Ohjelmien ja mallien oikeellisuuden toteamiseen liittyy kolme termiä, todentaminen (verifiointi), kelpoisuuden osoittaminen (validointi) ja arviointi (evaluointi). Todentaminen on mahdollista vain tarkasteltaessa suljettuja systeemejä, joissa vertailussa voidaan käyttää systeemiä kuvaavia todeksi todistettavissa olevia parametrejä (esim. ohjelmakoodien toiminnan todentaminen). Avoimissa systeemeissä ei absoluuttisesti tosia arvoja ole, ja siksi niiden sijasta käytetään parametreja, joiden katsotaan vastaavan todellisuutta mahdollisimman hyvin, esim. koetuloksia. Kelpoisuuden osoittaminen merkitsee ohjelman tai mallin tulosten yhtäpitävyyden osoittamista edellä mainitussa mielessä todellisuutta edustavien parametrien kanssa. Arviointi voi sisältää myös kvalitatiivisia argumentteja esim. sen suhteen, voidaanko ohjelman katsoa olevan käytännössä riittävän käyttökelpoinen ja luotettava, onko se riittävän huolellisesti dokumentoitu, jne.

CFAST-ohjelmisto, joka käsittää laskentaohjelmiston ja käyttöliittymän, on hyvin dokumentoitu ja sen kelpoisuutta on käsitelty lukuisissa julkaisuissa. Ohjelmalla laskettuja tuloksia on julkaistuissa artikkeleissa vertailtu kokeellisiin sekä eri kenttä- tai vyöhykemalleilla laskettuihin tuloksiin.

Tässä julkaisussa pyritään noudattamaan edellä mainitun ISO-dokumentin rakennetta. Luvussa 2 käsitellään palopatsasmalleja, ja luvussa 3 kuvataan vyöhykemalleja sekä yleisesti että CFAST-ohjelmassa toteutettujen piirteiden osalta. Ohjelman matemaattiset mallit ja niiden laskentaa käsitellään luvussa 4. Ohjelman kelpoisuuden arviointi vertaamalla sen tuloksia sekä muiden vyöhykemallien tuottamiin tuloksiin (kvalitatiivinen vertailu) että koetuloksiin (kvantitatiivinen vertailu) tehdään luvussa 5. Luvussa 6 arvioidaan ohjelman dokumentoinnin riittävyttä. Yhteenvedossa luvussa 7 tehdään – osittain subjektiivisesti – arvio ohjelman soveltuvuudesta ja sillä saatavien tulosten tarkkuudesta.

Tässä tehty työ on käytettävissämme olevien tietojen mukaan ensimmäinen järjestelmällinen yritys soveltaa ISOssa valmisteltavaa kelpoisuuden arvioinnin ohjetta. Työ on osoittanut, että kvantitatiivisten kelpoisuusrajojen arviointia sekä vyöhykemallille sinänsä että jollekin sitä soveltavalle ohjelmalle on tehty kovin vähän. Asian merkittävyyden vuoksi kansainväliset organisaatiot ja eri maiden tutkimuslaitokset ovat tekemässä kelpoisuuden arvioinnin edellyttämää työtä. Eräs merkittävimmistä hankkeista on ollut VTT Rakennustekniikan johdolla kansainvälisen rakennusalan tutkimusjärjestön CIB paloryhmässä W14 tehty laskentaohjelmistojen vertailuprojekti, jossa oli mukana yli 20 osallistujaa, jotka käyttivät noin kymmentä eri ohjelmistoa.

2. Palopatsasmallit

2.1 Yleistä

Tulipalon laskentamallien kannalta olennaisin osa on palo, jota yleensä kuvataan palotehon ja kuumien kaasujen noustessa syntyvää palopatsasta kuvaavien mallien avulla. Palopatsas toimii massaa ja energiaa siirtävänä pumppuna. Virtaus palopatsaassa on yleensä turbulenttia, paitsi palolähteen läheisyydessä palolähteen ollessa hyvin pieni (halkaisija alle 5 cm).

Nykyisistä palopatsasmalleista suuri osa perustuu MTT-malliin [Morton et al. 1956]. Tämä malli on ns. pistelähdemalli, jossa paloa kuvataan pistemäisenä lämmönlähteenä, joka sijaitsee pyörähdyssymmetrisen palopatsaan pystyakselilla. Pistelähteen korkeus joudutaan laskemaan käyttämällä kokeellisesti määritettyjä korrelaatioita.

Palopatsasmallien kelpoisuuden arviointi vaatii vielä paljon vertaamista kokeellisiin tuloksiin, esimerkiksi turbulenssimuuttujien arvoja tunnetaan huonosti. Seinä- ja nurkka-suihkujen teorian tuntemista tarvittaisiin erityisesti palon leviämisen mallintamisessa, mikä nykyisistä simulointimalleista puuttuu. Palopatsasmalleista on julkaistu useita kattavia katsauksia, jotka sisältävät viitteitä aikaisempiin julkaisuihin [Zukoski 1995, Heskestad 1995, Björkman & Keski-Rahkonen 1996, Hostikka 1997].

CFAST-ohjelmisto käyttää palon aiheuttamien massavirtausten laskennassa McCaffreyn kehittämää palopatsasmallia [McCaffrey 1979, 1983].

2.2 Rajoituksia

2.2.1 Palon voimakkuuden arviointi

Ennen simuloimista on tarkistettava, kuuluuko simuloitava palo palopatsasmallien määrittämisessä ja vertailussa perinteisesti käytettyjen kokeiden määräämään pätevyysalueeseen. Palon kokoa voidaan tutkia laaduttoman palotehon \dot{Q}_D^* , Frouden luvun Fr ja liekkien korkeuden z_{fl} perusteella.

2.2.1.1 Laaduton paloteho

Laaduton paloteho voidaan määrittellä palotehon \dot{Q} ja palavan alueen koon, jota kuvataan lähteen halkaisijan D avulla, perusteella seuraavasti:

$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g D D^2}}, \quad (1)$$

missä ρ_∞ , T_∞ ja c_p ovat ympäröivän kaasun, eli käytännössä ilman, tiheys, lämpötila ja ominaislämpö vakioaineessa (lämpötilan yksikkönä on käytettävä Kelvin-asteita ja ominaislämpö on ilmaistava yksiköinä $\text{kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$, kun paloteho ilmaistaan kilowatteina). Suure g on maan putoamiskiihtyvyyden (9,81 m/s^2). Nykyisten palopatsasmallien käyttöön kokeellisten tulosten pätevyyden kannalta luotettavaa, kun $0,2 < \dot{Q}_D^* < 2$. McCaffreyn koeksissa [McCaffrey 1979] sai \dot{Q}_D^* arvoja väliltä 0,2–0,8.

2.2.1.2 Frouden luku

Frouden luku kuvaa hitausvoimien suhdetta painovoimaan virtauksessa, ja se saadaan kaavalla

$$\text{Fr} = \frac{\dot{Q}_D^*}{\left(\frac{\Delta H_C}{(S+1)c_p T_\infty} \right)^{3/2} \sqrt{\chi_A - \chi_R}} \approx \frac{\dot{Q}_D^*}{20}, \quad (2)$$

missä S on ilman massan suhde polttoaineen massaan stoikiometrisessä reaktiossa ja ΔH_C on aineen palamislämpö. Monille orgaanisille yhdisteille $S > 10$, puulle $S = 5,7$. Suure χ_A on palamisen tehokkuus ja χ_R on säteilynä poistuvan energian osuus ($\approx 0,3$) [Delichatsios 1995]. Viimeinen likiarvokaava on saatu sijoittamalla tyypilliset arvot nimittäjässä esiintyvillä muuttujilla.

Palopatsasmallien soveltuvuus tulipalon mallintamiseen riippuu Frouden luvusta seuraavasti:

Nostesuihkut	$\text{Fr} \geq 2$	Eivät sovellu.
Allaspalot ym.	$0,1 \geq \text{Fr} \geq 0,01$	Soveltuvat.
”Liekkimeri”	$\text{Fr} < 0,01$	Eivät sovellu.

Allaspaloille annettu Frouden luvun rajoitus perustuu siihen, että palopatsasmallien kehittämiseksi käytetyt kokeelliset palot ovat käytännössä olleet hyvin kaukana nostesuihkuista.

Voimakkaasti ”liekkimerenä” palavaa huonetta, joka suurella todennäköisyydellä liekkahtaa, voidaan käsitellä simuloinnissa palonlähteenä muille huoneille: palamista kyseisen huoneen sisäpuolella ei simuloida, vaan sitä käytetään muiden huoneiden kannalta huoneen oviaukon kohdalla sijaitsevana yksittäisenä lähteenä.

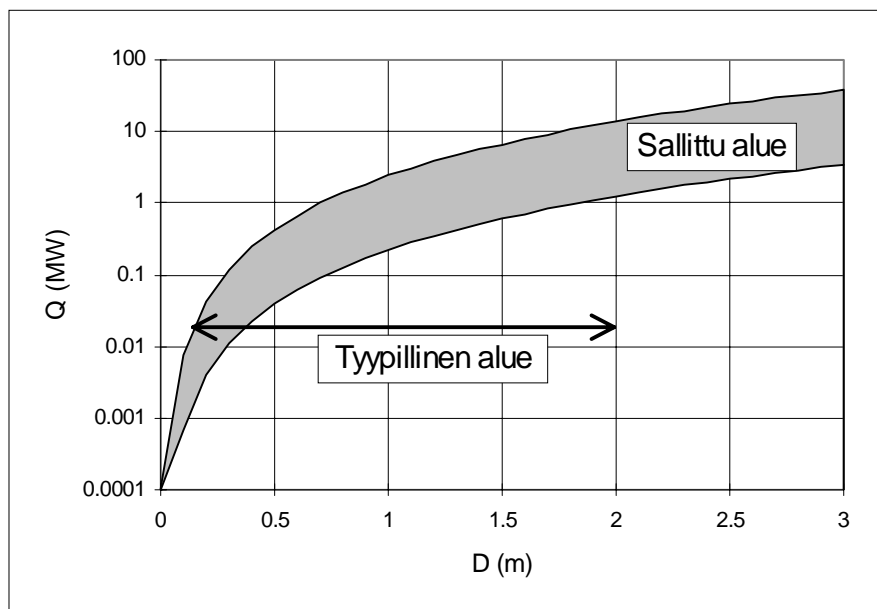
Kun rajoitukseen $0,01 \leq Fr \leq 0,1$ sijoitetaan kaavassa (2) esitetty likiarvo, saadaan laaduttomalle paloteholle rajoitus:

$$0,2 < \dot{Q}_D^* < 2. \quad (3a)$$

tai

$$220 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}} \leq \frac{\dot{Q}}{D^{5/2}} \leq 2200 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}}, \quad (3b)$$

missä jälkimmäinen muoto saadaan edellisestä sijoittamalla edelleen kaava (1) ja käyttämällä tyypillisiä ilman ominaisuuksia. Lasketut rajat on esitetty graafisesti kuvassa 1, mihin on merkitty tummalla kaavan (3b) osoittama sallittu alue. Lisäksi kuvaan on merkitty tyypillisten, palopatsasmallien kehittämiseksi käytettyjen palojen alue.



Kuva 1. Nykyisin käytössä olevien palopatsasmallien hyväksyttävä palotehoalue.

2.2.1.3 Liekin korkeus

Palon leviämisen ja sen rakenteita heikentävän vaikutuksen arvioimiseksi on usein arvioitava liekkien korkeutta. Jos tiedetään paloteho \dot{Q}_c (konvektiivisesti kuljettava osuus kokonaispalotehosta) ja palavan nestealtan halkaisija D , saadaan liekin korkeus z_{fl} Heskestadin kaavalla [Heskestad 1983]

$$z_{fl} = 0,23 \dot{Q}_c^{2/5} - 1,02D. \quad (4)$$

Tässä kaavassa paloteho ilmaistaan kilowatteissa ja pituudet metreinä. Kaksivyöhykemallissa liekin korkeus ei saisi olla huomattavasti simuloitavan huoneen korkeutta suurempi.

Esimerkki

Oletetaan, että 3,5 m korkeassa huoneessa palaa 0,45 m² heptaaniallas ($\dot{Q} = 800$ kW, $D = 0,76$ m) ympäristön lämpötilan ollessa 27 °C. Tällöin dimensioton paloteho on

$$\dot{Q}_D^* = \frac{800}{1,1 \cdot (27 + 273) \cdot 1,01 \cdot \sqrt{9,81} \cdot 0,76^{5/2}} \approx 1,4 \quad \text{ja liekin korkeus on}$$

$z_{fl} = (-1,02 \cdot 0,76 + 0,23 \cdot (0,7 \cdot 800)^{2/5}) = 2,1$ m, kun konvektiivisen osuuden oletetaan olevan 70 % kokonaispalotehosta.

Frouden luvun laskemiseksi pitää tuntea polttoaineen stoikiometrinen suhde. Heptaanin (C₇H₁₆) moolimassa $M = 100$ g/mol ja palamislämpö $\Delta H_c = 44,6$ MJ/kg. Palamisreaktio on C₇H₁₆ + 52,3 (0,21 O₂ + 0,79 N₂) → 7 CO₂ + 8 H₂O + 41,4 N₂, joten stoikiometriseksi suhteeksi ilman suhteen saadaan

$$S = \frac{52,3 \cdot (0,21 \cdot 32 \text{ g/mol} + 0,79 \cdot 28 \text{ g/mol})}{100 \text{ g/mol}} = 15.$$

Jos oletetaan, että $\chi_A = 1$ ja $\chi_R = 0,3$, niin Frouden luvuksi saadaan 0,06 eli tilanne sopii palopatsasmallille.

2.2.2 Palopatsaan nousukorkeus

Vyöhykemallin käyttö edellyttää sitä, että palossa syntyvän savun voidaan olettaa virtaavan ylös katon rajaan, jonne alkaa muodostua kuuma savupatja. Korkeat huonetilat voivat kuitenkin joissakin tilanteissa sisältää niin voimakkaan pystysuoran lämpötilagradientin, että palopatsaan tiheys on suurempi kuin ympäröivän ilman. Tällöin savu-

kaasut jäävät “kellumaan” huoneen keskivaiheille eikä kaksivyyöhykemallin oletus pidä paikkaansa. Tällaista tilaa kutsutaan kerrostuneeksi.

Heskestad on esittänyt pistelähdemalliin perustuvan kaavan huonepalossa syntyvän palopatsaan nousukorkeudelle [Heskestad 1989]:

$$z_p = 3,79 \left(\frac{T_a}{g c_p^2 \rho_a^2} \right)^{1/8} \dot{Q}_c^{1/4} \left(\frac{\partial T_0}{\partial z} \right)^{-3/8}, \quad (5)$$

missä \dot{Q}_c on palotehon konvektiivisesti kuljettava osuus (yksikkönä kW), $\frac{\partial T_0}{\partial z}$ on huoneen sisällä vallitseva lämpötilagradientti (yksikkö K m^{-1}), $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ on maan putoamiskiihtyvyys, c_p on ilman ominaislämpö (yksikkönä $\text{kJ K}^{-1} \text{kg}^{-1}$), T_a on ympäristön lämpötila palolähteen tasalla ja ρ_a on ilman tiheys lämpötilassa T_a .

Olkoon huoneen korkeus H metriä, ja oletetaan, että lämpötila kasvaa lineaarisesti. Tällöin suurimmaksi huoneen ylä- ja alaosien välillä vallitsevaksi lämpötilaeroksi $\Delta T_{0,\text{max}}$, jolla savu vielä nousee ylös saakka, saadaan

$$\Delta T_{0,\text{max}} = 34,9 \left(\frac{T_a}{g c_p^2 \rho_a^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} H^{-5/3} \approx 96 \dot{Q}_c^{2/3} H^{-5/3}. \quad (6)$$

Viimeinen yhtäsuuruus saadaan sijoittamalla tyypilliset arvot suureille c_p , T_a ja ρ_a . Tämä kaava muodostaa erään kvantitatiivisen muotoilun sille, miten palopatsasmallien käytön kannalta huoneen korkeus ja paloteho ovat kytkettyjä toisiinsa.

2.2.3 Huonetilan vähimmäisleveys

Nykyiset palopatsasmallit olettavat, että palopatsaan ympärillä on vapaata tilaa, josta patsas pystyy ottamaan lisäilmansa. Tämä asettaa simuloinnin kohteena olevan tilan leveydelle vähimmäismitan, koska palopatsasmalli ei toimi, jos patsaan reunat yltävät kiinni huoneen seiniin. Vähimmäismittaa kapeammissa, kuilumaisissa huoneissa palopatsasmallia ei enää voida pitää kovin luotettavana.

Huoneen kapeus voi kuitenkin vaikuttaa palopatsaaseen myös muilla tavoilla. Lähellä palopatsasta olevista oviaukoista tuleva vaakasuora virtaus esimerkiksi voi moninkertaistaa palopatsaan massavirran, mutta palopatsasmalleissa sitä ei ole toistaiseksi pystytty ottamaan huomioon [Rockett 1995].

Kvantitatiivisesti tilan vähimmäisleveyttä voidaan arvioida seuraavasti. Vaaditaan seinien ja patsaan keskiakselin vähimmäisetäisyydeksi etäisyys R , jolla pystysuora virtausnopeus on pienentynyt arvoon, joka on 10 % patsaan keskiakselilla vallitsevasta nopeudesta. Lausutaan tämä raja normaalijakauman muotoisen nopeusprofiilin $1/e$ -leveyden b avulla[†]. Suureen b lauseke sisältyy mm. Zukoskin analyttiseen palopatsasmalliin [Zukoski 1995], jonka avulla saadaan

$$R \approx 1,5 \quad b \approx 1,5 \cdot 0,13 \cdot (z + z_0) \approx 0,2 \quad z . \quad (7)$$

Huoneen katon rajassa voidaan siis asettaa vaatimus $R \geq 0,2 H$, missä H on huonekorkeus. Vastaava tulos olisi saatu myös käyttämällä Alpertin kattosuuhkumallia [Alpert 1972], missä palopatsaan yläpuolisen, homogeenisen alueen rajana pidetään etäisyyttä $r = 0,18H$. Huoneen vähimmäisleveydelle W_{\min} saadaan siis ehto

$$W_{\min} \geq 0,4 \quad H . \quad (8)$$

Jos palotilassa vaikuttaa sivuttaisvirtauksia, voi tulla tarpeelliseksi arvioida palopatsaan kallistumista. Asiaa tutkittu varsin paljon esim. Palavien öljyaltaiden turvallisuusetäisyyksiä määritettäessä, ja sille on esitetty useita malleja. Eräs tapa laskea palopatsaan akselin poikkeama pystysuunnasta, kulma θ , on [Drysdale 1999, s. 144]

$$\theta = 0^\circ, \text{ kun } V^* \leq 1 \quad (9)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{V^*}}\right), \text{ kun } V^* > 1$$

$$V^* = 0,53 \quad u_w \dot{Q}_c^{-1/5} \left(\frac{2 \quad c_p \rho_a T_a}{\pi \rho_{fv} \Delta H_c} \right)^{1/3},$$

missä u_w on palopatsaaseen vaikuttavan virtauksen nopeus (yksikkönä m/s), ρ_{fv} on polttoainehöyryjen tiheys (kgm^{-3}) ja ΔH_c on polttoaineen lämpöarvo (MJkg^{-1}). Symbolien c_p , T_a ja ρ_a merkitys ja yksiköt ovat samat kuin edellisessä kappaleessa.

Nyrkkisääntönä voidaan ainakin öljypalojen kyseessä ollen pitää sitä, että nopeudella 2 m/s kulkeva virtaus poikkeuttaa palopatsasta n. 45° .

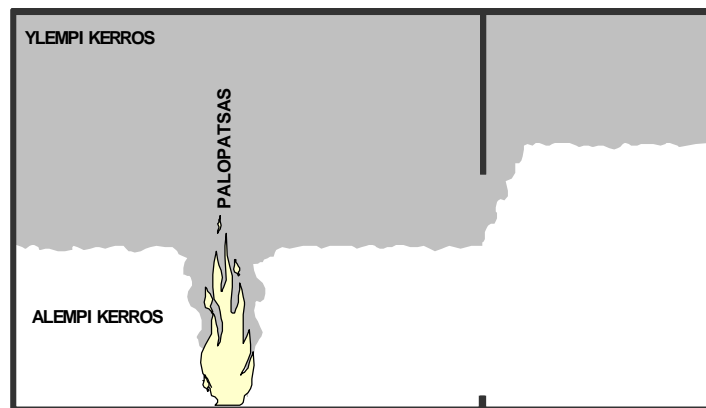
[†] Etäisyydellä b palopatsaan symmetria-akselista virtausnopeus putoaa arvoon, jonka suuruus on $1/e \approx 0,37$ akselilla olevasta arvosta.

3. Vyöhykemallit

3.1 Yleistä

Palon kehittymistä ennustavia analyttisiä malleja on kehitetty 1950-luvulta lähtien. Nämä mallit kuvaavat usein vain osaa paloon liittyvistä ilmiöistä. Niitä yhdistämällä ja edelleen kehittämällä on laadittu tietokoneohjelmia, jotka annettujen lähtöparametrien perusteella laskevat esim. lämpötilan nousua ja savun leviämistä. Nykyään nämä mallit ovat niin pitkälle kehitettyjä, että niitä on alettu yleisesti soveltaa käytännön rakennussuunnittelussa.

Vyöhykemalleissa jokainen huone on jaettu pieneen määrään kontrollitilavuuksia (vyöhykkeitä), joiden sisällä olosuhteiden oletetaan olevan joka pisteessä samat. Yleisimmin käytetään kaksivyöhykemalleja, joissa huone on jaettu vaakasuorassa suunnassa kahteen vyöhykkeeseen, jolloin lämpötila sekä savu- ja kaasupitoisuudet huoneessa muuttuvat vain pystysuorassa suunnassa (ks. kuva 2). Palolähteen yläpuolelle muodostuu palopatsas, jonka ei katsota kuuluvan kumpaankaan kerrokseen. Se pumppaa energiaa ja massaa alemmasta vyöhykkeestä ylempään [Quintiere 1996, Zukoski 1995, Keski-Rahkonen 1987].



Kuva 2. Kaksivyöhykemallin periaate: palossa vapautuva lämpö ja savu kertyvät huoneen ylempään osaan, jolloin huoneen alaosaan jää suhteellisen kirkas ja kylmä kerros. Palon aiheuttamia virtauksia kuvataan palopatsasmallilla. Nykyisissä tietokoneohjelmistoissa laskenta voi käsittää useampia huoneita.

Kaksivyöhykemallioletus perustuu kokeellisiin havaintoihin, joiden mukaan tulipalossa huoneeseen muodostuu kaksi vyöhykettä, yläosaan kuumia palokaasuja ja niiden mukana tullutta ilmaa sisältävä vyöhyke sekä alaosaan suhteellisen viileä, lähempänä ympäristön lämpötilaa oleva vyöhyke. Erot vyöhykkeiden sisällä ovat pieniä verrattuina vyöhykkeiden välisiin eroihin.

Kaksivyöhykemallioletus asettaa joitakin rajoituksia mallin käytölle. Vyöhykemallien ei yleensä katsota soveltuvan suuren tilan tai pitkän ja kapean tilan tulipalon simulointiin, mutta jakamalla vyöhykkeet keinotekoisesti pienempiin kontrollitilavuuksiin on tällais-tenkin tilojen laskennassa saatu kohtalaisen hyviä tuloksia. Kaksivyöhykemallit eivät myöskään sovellu simuloitaessa voimakkaasti turbulenteja tilanteita, joissa kaasujen kerrostumista ei pääse tapahtumaan.

3.2 CFAST-ohjelmiston kaksivyöhykemalli

CFAST-ohjelmiston päätoiminto on seuraavien suureiden laskeminen [Peacock et al. 1993a, Portier et al. 1992]:

- kaasukerrosten lämpötilat ja tilavuudet
- eri kaasukomponenttien pitoisuudet sekä optinen savuntiheys
- energian ja massan virtaus nosteen vaikutuksesta tai pakotetusti huoneissa sekä huoneiden ja aukkojen läpi
- lämmönsiirto pinnoille konvektion ja säteilyn kautta sekä lämmön johtuminen tilaa rajaavien rakenteiden läpi.

Näiden suureiden laskemisessa joudutaan määrittämään useita muitakin suureita, kuten paineen muutos ja puhtaan ilman sekoittumisesta aiheutuva laimentuminen.

Ajavana voimana systeemissä on palaminen, joka voi käsittää yhden tai useamman samassa huoneessa olevan palavan kohteen. Ohjelmisto ei sisällä pyrolyysimallia, minkä vuoksi palon kehitystä ei pystytä laskemaan, vaan se on annettava lähtötietona. Käytännössä tämä tehdään siten, että ohjelmaan syötetään lämmön tai massan vapautumisnopeuden aikakehitys jonkin palonkehitystä arvioivan mallin (esim. vakiopaloteho-oletuksen tai t^2 -mallin) tai esim. kokeista saadun tiedon mukaisesti.

Palon aiheuttamia massa- ja energiavirtauksia kerrosten välillä käsitellään McCaffreyn palopatsasmallin avulla. Huoneessa mahdollisesti esiintyvien muiden virtausten, esimerkiksi sivutuulen, vaikutusta palopatsaaseen ei oteta huomioon. Huoneiden välisessä energian ja massan siirtymisessä otetaan huomioon kerrosten välinen sekoittuminen vastakkaissuuntaisten virtausten rajapinnassa.

Polttoainerajoitteisessa palossa palaminen tapahtuu kokonaan palopatsaassa. Jos kyseessä on happirajoitteinen palo, virtaa palamatonta polttoainetta palohuoneen ylempään

kerrokseen, oviaukossa olevaan palopatsaaseen, viereisen huoneen ylempään kerrokseen jne. ja palaminen jatkuu, kunnes polttoaine loppuu tai virtaa ulos.

Palamisen kemiaa hallitaan ylläpitämällä hiilen, vedyn ja hapen tasapainoa kolmessa paikassa: palohuoneessa palopatsaan alemmassa ja ylempässä kerroksessa olevissa osissa sekä ovisuihkussa, joka imee ilmaa viereisen huoneen alemmasta kerroksesta ylempään.

Seinät, katto ja lattia voivat olla eri materiaalia ja jokaiselle pinnalle voidaan määritellä kolme eri kerrosta. Materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuus ei ole mukana mallissa. Säteilylämmönsiirtoon vaikuttava kaasukerroksen emissiivisyys riippuu voimakkaasti säteilevien komponenttien, kuten nokihiukkasten, hiilidioksidin ja veden, pitoisuuksista. Siten lämpötilat ja virtaukset, jotka riippuvat lämmön jakautumisesta eri kerroksiin, ovat kytkettyjä kaasun koostumukseen.

CFASTin nykyisessä versiossa oletetaan, että sekä massaa että energiaa siirtyy vain ylempään kerrokseen. Todellisuudessa liekki ja palopatsas yleensä säteilevät jonkin verran alempaan kerrokseen, joten edellä mainitusta olettamuksesta aiheutuen ylempi kerros on kuumempi ja alempi kerros viileämpi kuin todellisuudessa. Tämä koskee erityisesti täysin kehittyntä paloa.

4. CFAST-ohjelmassa käytetyt matemaattiset mallit ja laskenta

4.1 Perusyhtälöt

Vyöhykkeiden lämpötilojen ja tilavuuksien laskennan perustana ovat energian säilymislaki eli termodynamiikan 1. pääsääntö ja massan säilymislaki. Säilymislaeista johdetut CFASTin perusyhtälöt sisältävät lähde- ja nielutermeinä energian ja massan tuottoa, siirtymistä ja poistumista kuvaavia tekijöitä, joiden laskennalliseen kuvaamiseen CFASTissa käytetään useita alimalleja.

Tarkastellaan vyöhykkeen i lämpötilan ja tilavuuden laskentaa, missä indeksi $i = L$ viittaa alempaan vyöhykkeeseen ja $i = U$ ylempään vyöhykkeeseen. Lämpötilat T_i ja tilavuudet V_i riippuvat kerroksen massasta m_i , sisäisestä energiasta E_i ja koko tilassa vallitsevasta paineesta P . Kun kaasujen oletetaan noudattavan ideaalikaasulakia, muuttujien riippuvuutta toisistaan voidaan kuvata seuraavilla yhtälöillä:

$$\text{Tiheys} \quad \rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (10)$$

$$\text{Sisäinen energia} \quad E_i = c_v m_i T_i \quad (11)$$

$$\text{Ideaalikaasulaki} \quad P = R_{\text{gas}} \rho_i T_i \quad (12)$$

$$\text{Kokonaistilavuus} \quad V = V_L + V_U \quad (13)$$

Kaavassa (11) c_v on kaasun ominaislämpö vakiotilavuudessa. Suure R_{gas} kaavassa (12) on kaasun spesiifinen ideaalikaasuvakio, joka voidaan laskea yleisen kaasuvakion $R = 8,3143 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ja kaasun moolimassan M_{gas} avulla seuraavasti: $R_{\text{gas}} = R/M_{\text{gas}}$ (yksikkö $\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$). Kun ominaislämpö vakiotilavuudessa on c_v ja ominaislämpö vakio-paineessa c_p , ideaalikaasuvakio R_{gas} voidaan ilmaista seuraavasti: $R_{\text{gas}} = c_p(1-\gamma^{-1})$, missä γ on ominaislämpöjen suhde, $\gamma = c_p/c_v$. Ilmalle $c_p \approx 1\,040 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ja $\gamma = 1,4$.

Yhtälöiden (10)–(13) soveltamisen jälkeen systeemissä on neljä tuntematonta, P , V_U , T_U ja T_L , jotka voidaan ratkaista soveltamalla massan ja energian säilymislakeja kumpaankin kerrokseen. Paineen laskemiseksi tarkastellaan koko huoneen tilavuuden energian säilymistä olettaen kaasun tekemän työn (PdV/dt -termi) olevan pieni. Differentiaalimuodossa tämä voidaan ilmaista seuraavasti:

$$V \frac{c_v}{R_{\text{gas}}} \frac{dP}{dt} = \sum \dot{Q}_{\text{net}}, \quad (14)$$

missä yhtälön oikea puoli symboloi huoneen lämpötasetta.

Energian siirtymistä aukoissa käsitellään entalpiavirtoina \dot{h}_i , jotka käsittävät vyöhykkeen energian muutoksen ja paineen tekemän työn:

$$\dot{h}_i = \frac{dE_i}{dt} + P \frac{dV_i}{dt}. \quad (15)$$

Edellä esitetyistä yhtälöistä voidaan muodostaa seuraavat CFAST-ohjelman sisältämät differentiaaliyhtälöt vyöhykkeiden lämpötiloille, ylempään vyöhykkeeseen tilavuudelle ja paineelle.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U), \quad (16)$$

$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[(\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dt} \right], \quad (17)$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U + V_U \frac{dP}{dt} \right], \quad (18)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L + V_L \frac{dP}{dt} \right], \quad (19)$$

$$P = P_{\text{ref}} + \Delta P, \quad (20)$$

missä termit \dot{m}_U ja \dot{m}_L ovat vyöhykkeiden massojen muutosnopeudet, P_{ref} on ympäristön lämpötila ja ΔP kuvaa huoneen paineen muutosta.

Ylempään vyöhykkeeseen tilavuudesta voidaan ratkaista vyöhykkeiden rajapinnan sijainti eli savukerroksen korkeus.

Yhtälö (16) on kaavan (14) muunneltu muoto, jossa huoneen lämpötase on kirjoitettu ylempään ja alemman vyöhykkeen entalpiamuutosten \dot{h}_U ja \dot{h}_L avulla. Yhtälö (17) saadaan yhdistämällä kaavan (11) differentioitu muoto ja yhtälö (15). Yhtälöt (18) ja (19) seuraavat ylempään ja alemman vyöhykkeen energian säilymisyhtälöistä.

Palon tuottama energia ja massa sekä niiden kulkeutuminen on sisällytetty massa- ja entalpiatermeihin \dot{m}_U , \dot{m}_L , h_U ja h_L . Ne lasketaan ohjelmistoon sisällyvillä alimalleilla.

Yhtälöiden muodostamisessa on oletettu, että liikemäärä huoneen sisällä voidaan jättää huomioonottamatta. Lisäksi paine oletetaan lähes samaksi kaikkialla huoneen sisällä. Perusteena jälkimmäiselle approksimaatiolle on se, että muutamien kymmenien Pascalien paine-erot huoneessa ovat mitättömiä ilmakehän paineeseen verrattuna. Hydrostaattinen painenvaihtelu otetaan huomioon laskettaessa paine-eroja huoneiden välillä.

Laskennan alussa suureet initialisoidaan kaikissa huoneissa ympäristöolosuhteisiin. Ylemmän kerroksen tilavuuden oletusarvoksi asetetaan pieni nolasta poikkeava luku (huoneen tilavuuden tuhannesosa) matemaattisten ongelmien välttämiseksi.

4.2 Alimallit

Perusyhtälöitä täydentävät alimallit sisältävät fysikaalisen tilanteen likimääräisen kuvauksen ja niitä voidaan periaatteessa muuttaa varsin vapaasti esim. uusien parempien kuvaamistapojen kehittymisen myötä. CFAST sisältää tällä hetkellä alimallit seuraavien prosessien kuvaamiseksi:

- palo (lämmöntuotto ja palamisen kemian kuvaus)
- energian ja massan kuljettuminen palosta: McCaffreyn palopatsasmalli, ks. kohta 4.2.1
- virtaukset aukoissa, ks. kohta 4.2.2
- lämmönsiirtomekanismit
 - lämmönsiirto säteilyn välityksellä
 - konvektiivinen lämmönsiirto
 - lämmön johtuminen kiinteiden väliainekerrosten läpi
 - kattosuihkuvirtaukseen liittyvä lämmönsiirto
- kaasun eri komponenttien pitoisuudet ja kerrostuminen pinnoille
- sprinklerimalli
- palonarkojen objektien, kuten huonekalujen, syttyminen.

Jatkossa esitellään hieman tarkemmin kaksi alimallia, nimittäin palopatsasmalli ja virtausta aukoissa kuvaava malli.

4.2.1 Virtaus palopatsaassa: McCaffreyn palopatsasmalli

McCaffreyn palopatsasmallin [McCaffrey 1979, 1983] on kokeellisiin tuloksiin perustuva pistelähdemalli, jossa palopatsas on jaettu kolmeen osaan, pysyvään liekkiin, hulmahtelevaan liekkiin ja savupatsaaseen. Mallin mukaan palolle, jonka palotehon konvektiivinen osuus on \dot{Q}_c , palopatsaassa kulkeva massavirtaus \dot{m}_e korkeudella z voidaan laskea seuraavia kaavoja käyttäen:

$$\text{Pysyvä liekki} \quad \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}_c} = 0,011 \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{0.566}, \text{ kun } 0,00 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \leq 0,08 \quad (21)$$

$$\text{Hulmuava liekki} \quad \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}_c} = 0,026 \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{0.909}, \text{ kun } 0,08 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \leq 0,20 \quad (22)$$

$$\text{Savupatsas} \quad \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}_c} = 0,124 \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{1.895}, \text{ kun } 0,20 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}}. \quad (23)$$

Näissä kaavoissa suureiden z , \dot{m}_e ja \dot{Q}_c yksiköt ovat m, kg/s ja kW.

4.2.2 Virtaus aukoissa

Virtaus kahden tilan välillä vertikaalisten aukkojen läpi (esim. ovien ja ikkunoiden), tapahtuu tilojen välisen paine-eron ajamana. CFAST-ohjelmistossa virtausta vertikaalisten aukkojen läpi kuvataan Bernoullin yhtälöllä. Sen mukaan väliaine, jonka tiheys on ρ , virtaa aukossa, jonka yli vaikuttaa paine-ero Δp , nopeudella

$$v = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (24)$$

Kerroin $C \approx 0,7$ ottaa huomioon aukossa tapahtuvat painehäviöt.

Massavirtaus aukossa \dot{m}_{vent} saadaan integroimalla elementaariset massavirtausalkiot $\rho v dz dx$ aukon yli

$$\dot{m}_{\text{vent}} = \int_{\text{width}} dx \int_{\text{height}} dz \rho(z)v(z) = W \int_{\text{height}} dz \rho(z)v(z), \quad (25)$$

missä W on aukon leveys. Integraalia (25) laskettaessa on otettava huomioon vyöhykkeiden rajapinnan paikka aukon suhteen.

Kuumien kaasujen virratessa ulos huoneesta tapahtuu ilmavirtausten sekoittumista, joka vaikuttaa massavirtoihin. Tämä on CFAST-ohjelmistossa mallinnettu käyttämällä palopatsaan massavirtauksen mallia muistuttavaa lähestymistapaa.

Horisontaalisissa aukoissa virtaus voi olla vertikaalisten aukkojen virtausta monimutkaisempaa. CFAST-ohjelmistossa virtaus horisontaalisissa aukoissa lasketaan käyttäen Cooperin kehittämiä korrelaatioita [Cooper 1996].

4.3 Numeeriset menetelmät

Vyöhykemallia kuvaavat differentiaaliyhtälöt ovat jäykkiä. Fysikaalisesti tämä johtuu siitä, että yhtälöiden kuvaamien suureiden muutosten aika-asteikot poikkeavat suuresti toisistaan. Etenkin paine seuraa olosuhteiden muutoksia huomattavasti nopeammin kuin vyöhykkeiden lämpötilat tai savukerroksen korkeus. Tästä johtuen vyöhykemallien differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen tarvitaan yleensä erityiset ratkaisimet. Runge-Kutta-menetelmät tai Adams-Bashforthin kaltaiset menetelmät (predictor-corrector methods) vaativat erittäin pienet aika-askleet lyhyen aika-asteikon ilmiöiden seuraamiseen. Menetelmillä, jotka laskevat Jacobin matriisin tai approksimoivat sitä, on paljon suurempi stabiilisuusalue ja niillä saadaan parempia ratkaisuja. CFASTin differentiaaliyhtälöiden ratkaisin on DASSL.

4.4 Ohjelmiston rajoitukset

Ohjelmistoa tehtäessä on jouduttu käytännön syistä tai teoreettisen tiedon puutteesta johtuen tekemään approksimaatioita, jotka aiheuttavat tuloksiin epävarmuutta. Näiden oletusten ja rajoitusten tunteminen on luotettavien tulosten saamisen kannalta tärkeää. Tärkeimpien parametrien suhteen on syytä tehdä aina herkkyysanalyysi seuraavien epävarmuustekijöiden arvioimiseksi:

- Vyöhykemallioletuksesta seuraava kerrosten homogeenisuuden aiheuttama rajoitus.
- Palopatsasmallin rajoitukset korkeussuunnassa voivat vaikuttaa mallin käytettävyyteen korkeiden tilojen laskennassa.
- Palon kehittymistä kuvaavan mallin puuttuminen. Käyttäjä määrittelee palotehon tai massan muutoksen ajan funktiona. Kokeellista materiaalia käytettäessä koetilanteen ja laskettavan tilanteen erilaisuus saattaa aiheuttaa virheitä.

- Materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuutta ei oteta huomioon.
- Happirajoitteisessa palossa saattaa palohuoneessa palaneen massan määrä olla käyttäjän määrittelemää pienempi, jolloin palaminen tapahtuu muualla.
- Lieskahduksen jälkeisessä palokemiassa on approksimaatioita, koska teoriaa ei tarkoin tunneta.
- Happirajoitteisessa palossa matala happipitoisuus saattaa aiheuttaa epätäydellisessä palamisessa syntyvien tuotteiden, kuten CO:n, saannin lisääntymistä. CO/CO₂-suhteen määrittämiseen annetaan tämän vuoksi ohjeita.
- Lisäilman hallinta perustuu kokeellisesti määritettyihin funktioihin. Monihuone-mallissa pienet virheet jokaisessa ovisuihkussa saattavat kertaantua ja aiheuttaa huomattavan virheen kauimmaisissa tiloissa. Todentamiskokeissa saatujen koetulosten perusteella useimmissa vyöhykemalleissa käytetyt lisäilmakertoimet antavat hyvän tuloksen kolmehuonemalleille. Suurempien huonemäärien todentamiseen tarvitaan lisää koeaineistoa.
- Sivutuulen vaikutusta palopatsaaseen ei oteta huomioon.
- Savun virtausta seinää pitkin alaspäin ei ole mallinnettu. Tämä saattaa aiheuttaa aliarviointia alemman kerroksen pitoisuuksiin, mikä aiheuttaa virhettä säteilylämmön jakautumiseen eri kerroksiin.
- Kun savukerros laajenee palohuoneessa, se aiheuttaa alempaan kerrokseen virtausta oviaukon kautta viereiseen huoneeseen, jossa malli sijoittaa virtauksen kokonaan alempaan kerrokseen. Jos palohuoneen kuuma kerros on korkeammalla kuin oviaukon yläreuna, ei ylemmästä kerroksesta ole virtausta viereiseen huoneeseen, jolloin ovisuihkun aikaansaama patsas ei ole vielä muodostunut eikä viereisessä huoneessa esiinny virtausta alemmasta kerroksesta ylempään. Tästä on seurauksena se, että ylemmän kerroksen lämpötila on pienempi kuin alemman kerroksen lämpötila, mikä on fysikaalisesti mahdoton tilanne.
- Hyvin nopeasti kasvavan palon laskentaa voi rajoittaa fysikaalisen tilanteen kehittyminen selvästi vyöhykemallin oletuksista poikkeavaksi.

5. Mallin kelpoisuuden tarkastelu

5.1 Simulointimallien vertailu

5.1.1 Palopatsasmallit

Rockett [1995] on tarkastellut kolmessa eri vyöhykemalliohjelmassa käytettyä neljää eri palopatsasalgoritmia ja verrannut laskennassa saatuja tuloksia raportoituun kokeelliseen aineistoon [Steckler et al. 1982, Nakaya et al. 1986]. Simulointiohjelmat olivat FIRST, CFAST20 ja BRI2 versio VR. Suurin huoneen pinta-ala tutkituissa tapauksissa oli n. 12 m² ja suurin huonekorkeus 4 m.

Huoneeseen sisään tulevissa massavirtauksissa todettiin merkittäviä eroja ja parhaitenkin toimivat algoritmit ennustivat mitattuja arvoja huomattavastikin pienempiä virtauksia. Tämän voidaan olettaa johtuvan palopatsasmallien kehittämiseen käytettyjen koe-tulosten suuresta sisäisestä vaihtelevuudesta ja malleissa huonosti mukana olevasta mahdollisuudesta simuloida sivutuulesta aiheutuvan lisäilmavirtauksen vaikutusta.

McCaffreyn algoritmi oli mukana kaikissa edellä mainituissa ohjelmissa, mutta eri ohjelmilla saaduissa tuloksissa oli eroja, jotka todennäköisesti johtuivat siitä, miten algoritmi on sisällytetty ohjelmaan. Stecklerin huonepalokokeen simuloinnissa CFASTilla lasketut massavirtaukset huoneeseen olivat yleensä hieman mitattuja arvoja pienempiä, mutta erot pienenevät palotehon kasvaessa (Nakayan huonepalokokeet). Aukon leveyden kasvaessa (Stecklerin huonepalokokeet) erot mitattuihin arvoihin pienenevät. Eri lattia-materiaaleilla saatiin jonkin verran toisistaan poikkeavat alemman kerroksen lämpötilat, jotka myös olivat olivat mitattuja arvoja alemmat.

Tuloksista päätellään, että vyöhykemallit ennustavat virtauksen huoneeseen liian pieneksi, kuuman kerroksen lämpötilan liian korkeaksi ja kuuman kerroksen paksuuden liian pieneksi, ellei ovesta tulevaa lisäilmavirtausta oteta huomioon. McCaffreyn palopatsasmallin todettiin antavan liian korkeita massavirtauksen arvoja, kun palopatsas on korkealla liekin yläpuolella, ja siten soveltuvan huonosti korkeiden tilojen palojen laskentaan.

5.1.2 Huonetilojen mallintaminen

Rakennuksen mallintamisen vaikutusta suuren tilan simuloinnin tuloksiin käytettäessä CFASTia on tutkittu jakamalla huone useampaan osaan samalla periaatteella kuin kenttämallisimuloinnissa generoidaan kontrollitilavuuksista muodostuva laskentahila. Tällöin laskennassa saadaan esiin eroja myös vyöhykkeen sisällä vaakasuorassa suunnassa [Chow 1996a]. Osat on yhdistetty pystysuorilla aukoilla. Rajoittavana tekijänä tä-

män menetelmän käytössä on CFASTin maksimihuonelukumäärä 15. Menetelmän etuna verrattuna kenttämallin käyttöön on suhteellisen lyhyt laskenta-aika. Lisäksi vyöhykemalliohjelmien eduksi katsottiin se, että niissä on mukana runsaasti empiirisiin tuloksiin perustuvaa palamisen fysikaalisten prosessien kuvausta, mikä kenttämalleista etenkin tuohon aikaan vielä paljolti puuttui.

Laskennassa käytettiin neljää eri rakennuksen mallia: 1-, 3-, 9- ja 15-huonemallia. CFASTin versiossa 2.0 voi huoneessa olla neljä aukkoa, mikä mahdollistaa keinotekoisien tilajaon käytön. Mallinnettava huone oli kooltaan 60 m x 60 m x 3 m. Paloteho oli kaikissa tilanteissa sama ja palolähde huoneen keskellä. Monihuonemallilla saadaan paksumpi ja viileämpi savukerros. 1-huonemallilla lasketun savukerroksen lämpötilan ero monihuonemalliin verrattuna voi olla jopa 20 %. Tätä eroa voidaan pienentää aukkojen kertoimia säätämällä. Artikkelissa tarkasteltiin myös aiemmin julkaistua laskentaa [Peacock et al. 1993 b], jossa palohuoneesta (2,54 m x 2,54 m, korkeus 1,6 m) on 0,2 m leveä ja 1,6 m korkea aukko käytävään, jonka pituus on 12,19 m, leveys 2,44 m ja korkeus 2,44 m). Käytävä laskettiin sekä yhtenä tilana että jaettuna kolmeen osaan. Saadut savukerroksen keskilämpötilat olivat hyvin yhtäpitäviä, mutta huomattavasti kokeellisia korkeampia ja myös CFASTin vanhalla versiolla saatuja lämpötiloja korkeampia. Artikkelissa katsotaan, että vyöhykemallia voidaan käyttää suurten tilojen palosimulointiin, vaikka kelpoisuuden osoittaminen katsottiinkin vajavaiseksi. Johtopäätöksenä todetaan CFASTin versio 2.0 sopivaksi palosimulointiohjelmaksi insinöörisovelluksiin.

5.1.3 Laskentaohjelmien vertailu

Chow on verrannut neljän eri vyöhykemallin (CFAST, FIRST, CCFM.VENTS ja FIRECALC) sekä itse kehittämänsä kenttämallin soveltuvuutta kolmen erikokoisen atriumin savulla täyttymisen simulointiin [Chow 1995a]. Palon oletettiin syttyvän atriumin keskellä lattiatasossa. Vertailussa olivat mukana CFASTin versiot 1.5 ja 2.0. Kaikissa tilanteissa simuloidun tilan tilavuus oli 16 000 m³ ja atriumin mitat olivat:

	Pituus (m)	Leveys (m)	Korkeus (m)
1	25,2	25,2	25,2
2	40	20	20
3	20	20	40

Alkuvaiheessa palotehon oletettiin kehittyvän nopean palon t^2 -mallin mukaisesti, jossa alkupalon kasvukerroin on 47 W/s², minkä jälkeen palamisen oletettiin jatkuvan vakio-paloteholla 1,5 MW. Vyöhyke- ja kenttämallit antoivat samankaltaisia tuloksia. CFASTilla lasketut lämpötilat vastasivat hyvin kenttämallilla saatuja. Palotilanteissa 1 ja 2 saatiin CFASTilla hieman matalampia lämpötiloja kuin kenttämallilla, ero oli kor-

keintaan 15 %. Palotilanteessa 3 CFASTilla saatiin muutaman asteen korkeampia lämpötila kuin kenttämallilla. Savupatja laski vyöhykemallisimuloinneissa nopeammin ja palotilannetta 1 lukuun ottamatta myös alemmaksi kuin kenttämallilla laskettaessa. Kaikkien neljän tutkittavan vyöhykemallin todettiin huolellisesti käytettynä soveltuvan savukerroksen todennäköisen korkeuden ja lämpötilan nopeaan ennustamiseen. Pitkän laskenta-ajan vaativaa kenttämallia voidaan käyttää yksityiskohtaisempaan analyysiin.

Julkaisussa [Chow 1996b] on käytetty CFAST-ohjelmaa (versio 2.0) atriumin kattoon sijoitetun sprinklerin toiminnan arviointiin. Sprinklerin aktivoituminen riippuu ympäröivän kaasun lämpötilasta, joka laskettiin sekä kokeellisella palopatsasmallilla että simuloimalla palotilanne CFASTilla. Atriumin koko eri palotilanteissa oli seuraava:

	Pituus (m)	Leveys (m)	Korkeus (m)
1	20	20	10
2	20	20	20
3	20	20	30

Tutkimuksessa tarkasteltiin kolmea atriumin tulipalossa mahdollista palotilannetta: palotilanteessa 1 palo on atriumissa lattian tasolla, palotilanteessa 2 palo syttyy matalalla olevassa atriumiin liittyvässä myymälässä, jossa palo saattaa laskenta-aikana kehittyä lieskahdustilaan, ja palotilanteessa 3 palo syttyy ylhäällä olevassa atriumiin avautuvassa huoneessa, jossa palo saattaa laskenta-aikana edetä lieskahduksen jälkeiseen tilaan. Simuloinneissa maksimipalotehon oletettiin olevan 1–5 MW, joka saavutettiin kaikissa palotilanteissa 60 sekunnissa. Tämän jälkeen palamisen oletettiin jatkuvan vakioteholla 1 200 sekuntiin asti ja laskevan arvoon 0 hetkellä 1 320 s. Palotilanteessa, jossa katon korkeus oli 10 m, saatiin kokeellisella kaavalla ja simuloimalla hyvin samanlaiset tulokset, muissa tapauksissa simulointi antoi huomattavasti korkeamman lämpötilan, 5 MW:n palossa lähes kaksinkertaisen. Kokeellisella palopatsasmallilla saatuja tuloksia verrattiin julkaistuihin 30 m korkeassa tilassa tehdyissä kokeissa saatuihin tuloksiin ja malli ennusti lämpötilan melko hyvin. Palotilanteissa 2 ja 3 oli simulointituloksissa huomattavia eroja. Palotilanteessa 2 tilan täytyminen savulla oli samankaltaista kuin tilanteessa 1, ainoastaan lämpötila oli alhaisempi. Palotilanteessa 3 saatiin ohuempi ja kuumempi savupatja. Yhteenvedossa todettiin, että palotilanteessa 1 kokeellisella mallilla saadut tulokset ja palotilanteessa 3 CFASTilla saadut tulokset olivat realistisia, mutta tilanteen 2 analysoimiseksi katsottiin tarvittavan vielä lisätietoja, kuten täysimittakaavaisia kokeita.

Useiden aiemmin dokumentoitujen palokokeiden tuloksia simuloitiin PHOENICS-kenttämalliohjelmalla ja verrattiin CFASTilla saatuihin tuloksiin viitteessä [Chow 1995d]. Hägglundin [1992] raportoimassa kokeessa palotilasta, jonka korkeus oli 2,6 m, oli aukko 6,1 m korkeaan huoneeseen. CFASTilla saatiin kuumen kerroksen lämpötilalle ja korkeudelle kokeellisten arvojen kanssa hyvin yhteensopivat tulokset.

5.2 Kokeellinen todentaminen

Fysikaalista tapahtumaa kuvaavan mallin kelpoisuuden mitta on mallin kyky ennustaa todellisessa tilanteessa havaittavia arvoja. Palon kehittymisen vyöhykemallin tapauksessa ainakin laskettujen vyöhykkeiden lämpötilojen, niiden rajapinnan korkeuden ja aikojen, joissa nämä suureet saavuttavat turvallisuuden kannalta oleellisia arvoja, tulisi vastata riittävän hyvin todellisissa tulipaloissa esille tulevia arvoja. Myös muilla suureilla, kuten kaasupitoisuuksilla, on merkitystä ihmisten ja omaisuuden turvallisuuden kannalta.

Vaikeutena mallien tulosten pätevyyden todentamisessa ovat todellista tulipalotilannetta kuvaavien tietojen puutteellisuus ja tulosten vertaamiseen liittyvä epävarmuus. Mallien tulosten vertaamista koetuloksiin vaikeuttavat mm. seuraavat seikat:

- Tietoja täysimittaisista paloista rakennuksissa on saatavilla vain vähän (tiedot koskevat usein suuren mittakaavan laboratoriokokeita tai todellista tulipaloa pienempiä kokeita rakennuksissa).
- Mittaustietoihin liittyy seuraavia epävarmuustekijöitä:
 - Lukemiin liittyvä ilmiöiden luonteesta johtuva satunnaisvaihtelu on suurta.
 - Mittaustuloksiin voi liittyä systemaattisia virheitä (esim. säteilyn aiheuttama virhe lämpötilamittauksissa).
 - Mittausinstrumenttien määrä voi olla niin vähäinen tilan kokoon verrattuna, että niiden lukemat eivät anna oikeaa kuvaa tilassa vallitsevista olosuhteista (ääripäätä tässä suhteessa edustaa kaasujen pitoisuuksien mittaaminen, jota useimmiten mitataan vain yhdellä anturilla).
 - Mitatut suureet eivät useinkaan ole suoraan vertailukelpoisia mallin tuottamiin suureisiin, vaan vertailuluvut pitää johtaa mittaustuloksista (esim. kerrosten rajan määrittäminen lämpötilamittauksista vaatii jonkin sopivaksi katsotun kriteerin käyttämistä).
- CFAST vaatii syöttötietona tiedon vertailumateriaaliin liittyvästä palotehosta, mihin liittyy epävarmuustekijöitä siksi, että paloteho voi olla tunnettu huonosti (esim. määritetty vain palokuorman kokonaismassan muutoksen perusteella), tai siksi, että CFASTin rajoitukset palotehokäyrän esittämisessä estävät kokeessa toteutuneen palotehon kehityksen riittävän tarkan kuvaamisen. Erityisesti palon kehittymisen alkuhetket voivat jäädä puutteellisesti kuvatuiksi.
- Mallinnettaessa palotilan geometriaa ja muita tekijöitä, kuten materiaalien käyttäytymistä, voidaan joutua tekemään approksimaatioita, jotka heikentävät laskettujen ennusteiden vertailukelpoisuutta koetuloksiin.

- Rakennuksissa esiintyy vuotoja, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi esim. savukerroksen korkeuteen ja kaasupitoisuuksiin. Näiden mallintaminen CFAST-ohjelmalla on vaikeaa tai jopa mahdotonta.

Vaikka edellä mainitut seikat eivät kuitenkaan estä mallien tulosten ja kokeellisten tulosten vertailua, ne on kuitenkin syytä pitää mielessä vertailutuloksia tarkasteltaessa.

5.2.1 Vertailuaineisto

Seuraavassa on esitetty 11 paloalan kansainvälisessä julkaisussa esitetystä artikkelista kerättyjä tietoja kokeellisten tulosten ja CFAST-ohjelmalla laskettujen tulosten yhteensopivuudesta. Selvitys kattaa yhteensä 46 koetta, joiden olennaisimpia tietoja on esitetty taulukossa 1.

Lähdeartikkeissa koetilanteita ja saatuja tuloksia luonnehditaan seuraavasti.

Peacock et al. ovat verranneet CFAST-ohjelmalla laskettuja tuloksia täysimittakaavaisissa palokokeissa saatuihin tuloksiin [Peacock 1993a]. Vertailun tarkoituksena oli määrittää tärkeimpien laskettujen muuttujien tarkkuus sekä selvittää mallissa käytettyjen algoritmien pätevyyttä ja heikkouksia. Mallitettavat rakennukset olivat yksi-huoneisesta rakennuksesta monikerroksiseen hotelliin. Tuloksissa esiintyvien selvien erojen katsotaan johtuvan ohjelman sekä suoritettujen kokeiden rajoittuneisuudesta.

Taulukko 1. CFAST-mallin ja kokeellisten tulosten vertailussa käytetty aineisto.

Nro	Viite	Koe	Laitos ¹⁾	Huoneiden lkm	H _{FR} ²⁾ (m)	A _{FR} ²⁾ (m)	Paloteho (kW)	RHR/V _{FR} ³⁾ (kW/m ³)
1	[Peacock 1993 a]	case 1/1	NIST	1	2,4	8,9	2900	139
2	[Peacock 1993 a]	case 1/2	NIST	1	2,4	8,9	2900	139
3	[Peacock 1993 a]	case 2/1	NIST	1	2,4	8,9	7000	335
4	[Peacock 1993 a]	case 2/2	NIST	1	2,4	8,9	7000	335
5	[Peacock 1993 a]	case 3/room 1	NIST	3	2,5		100	
6	[Peacock 1993 a]	case 3/room 2	NIST	3	2,5		100	
7	[Peacock 1993 a]	case 3/room 3	NIST	3	2,5		100	
8	[Peacock 1993 a]	case 4/room 1	NIST	4	2,5	13,3	1000	30
9	[Peacock 1993 a]	case 4/room 2	NIST	4	2,5	13,3	1000	30
10	[Peacock 1993 a]	case 4/room 3	NIST	4	2,5	13,3	1000	30
11	[Peacock 1993 a]	case 4/room 4	NIST	4	2,5	13,3	1000	30
12	[Peacock 1993 a]	case 5/data 1	NIST	large	2,5		3000	
13	[Peacock 1993 a]	case 5/data 2	NIST	large	2,5		3000	
14	[Chow 1995 c]	case g1	DBSE	1	2,5	119,6	5000	17
15	[Chow 1995 c]	case g2	DBSE	1	2,5	119,6	5000	17
16	[Chow 1995 c]	case g3	DBSE	1	2,5	119,6	5000	17
17	[Chow 1995 d]	tests at BRI (Nakaya et al.)	DBSE	2	2,2	12,2	170	6
18	[Chow 1995 d]	tests at BRI (Nakaya et al.)	DBSE	2	2,2	12,2	340	13
19	[Chow 1995 d]	tests at BRI (Nakaya et al.)	DBSE	2	2,2	12,2	600	23
20	[Chow 1994]	tests at FOA (Hägglund), t1/r1	DBSE	2	2,6	12,0	250	8
21	[Chow 1994]	tests at FOA (Hägglund), t1/r2	DBSE	2	2,6	12,0	250	8
22	[Chow 1994]	tests at FOA (Hägglund), t5/r1	DBSE	2	2,6	12,0	250	8
23	[Chow 1994]	tests at FOA (Hägglund), t5/r2	DBSE	2	2,6	12,0	250	8
24	[Collier 1996]	trial A	BRANZ	5	2,4	23,3	20	0,4
25	[Collier 1996]	trial B	BRANZ	5	2,4	23,3	2000	36
26	[Collier 1996]	trial C (c1)	BRANZ	5	2,4	9,0	250	12
27	[Collier 1996]	trial C (c4)	BRANZ	5	2,4	9,0	250	12
28	[Collier 1996]	trial C (c5)	BRANZ	5	2,4	9,0	250	12
29	[Dembsey et al. 1995]	test with 330 kW	WPI	1	2,5	9,3	330	14
30	[Dembsey et al. 1995]	test with 630 kW	WPI	1	2,5	9,3	330	14
31	[Dembsey et al. 1995]	test with 980 kW	WPI	1	2,5	9,3	330	14
32	[Fu & Fan 1996]	full door width	Hefei	2	2,5	7,8	100	5
33	[Fu & Fan 1996]	½ door width	Hefei	2	2,5	7,8	100	5
34	[Fu & Fan 1996]	¼ door width	Hefei	2	2,5	7,8	100	5
35	[Fu & Fan 1996]	1/8 door width	Hefei	2	2,5	7,8	100	5
36	[He & Beck 1997]	room D101	CESARE	2	2,4	8,6	300	14
37	[Luo & He 1998]	test 3	CESARE	2	2,4	8,6	50	2
38	[Luo & He 1998]	test 4	CESARE	2	2,4	8,6	70	3
39	[Luo & He 1998]	test 5	CESARE	2	2,4	8,6	90	4
40	[Luo & He 1998]	test 6	CESARE	2	2,4	8,6	140	7
41	[Luo & He 1998]	test 7	CESARE	2	5,4	8,6	470	10
42	[Luo & He 1998]	test 8	CESARE	2	5,4	8,6	470	10
43	[Luo & He 1998]	test 9	CESARE	2	5,4	8,6	6600	141
44	[Luo & He 1998]	test 10	CESARE	2	5,4	8,6	2200	47
45	[Bailey et al. 1998]	Berthing 2	NIST & NRL	1	2,4	31,2	8000	107
46	[Mowrer & Gautier 1999]	FM & SNL test series, test FMSNL4	UMD & RDD	1	6,1	223,3	500	0,4

¹⁾ Lihenteiden selitys: BRANZ - Building Research Association of New Zealand (Porirua, New Zealand), CESARE - Centre for Environmental Safety and Risk Engineering (Melbourne, Australia), DBSE - Department of Building Services Engineering, (Hong Kong), Hefei - State Key Lab of Fire Science (Hefei, Kiina), NIST - National Institute of Standards and Technology (MD, USA), NRL - Naval Research Laboratory (Washington D.C., USA), RDD - Research and Development Division Electricité de France, UMD - University of Maryland (MD, USA), WPI - Worcester Polytechnic Institute (MA, USA),

²⁾ H_{FR} on palohuoneen korkeus ja A_{FR} on sen lattian pinta-ala.

³⁾ Paloteho palohuoneen tilavuusyksikköä kohti.

Dembsey et al. 1995 ovat arvioineet CFAST- ja FIRST-ohjelmia sekä joitakin yksinkertaisempia malleja vertaamalla laskettuja tuloksia täysimittakaavaisissa palokokeissa saattuihin tuloksiin [Dembsey et al. 1995]. Tarkasteltava rakennus käsitti yhden pinta-alaltaan $2,5 \times 3,7 \text{ m}^2$ suuruisen ja 2,5 m korkean huoneen, josta oli yksi aukko ulos. Koe-tulosten perusteella tarkastellaan kattosuihkun lämpötiloja, lämpövirran tiheyksiä eri pinnoilla sekä lämmönsiirtokertoimia. Malleilla laskettiin ylemmän ja alemman kerroksen sekä lattian lämpötilat, rajapinnan ja neutraalitason korkeudet ja massavirtausnopeus aukossa.

Viitteissä [Bailey et al. 1998] ja [Braun et al. 1992] on arvioitu CFAST-ohjelman kelpoisuutta vertaamalla laivatiloissa tehtyjen palokokeiden tuloksia laskettuihin tuloksiin. Kokeet oli suunniteltu palotilaa ympäröivien tilojen savunpoistojärjestelmän arvioimiseksi. Polttoaineena oli dieselöljy- tai polyetyleni ja paloteho kokeissa oli 0,5 MW ja 1,0 MW. CFAST-ohjelmalla todettiin voitavan ennustaa tulipalon luomat ympäristöolosuhteet suhteellisen luotettavasti.

Chow on käyttänyt kolmea vyöhykemalliohjelmia BRI2, CCFM.VENTS ja CFAST palokammiokokeiden simulointiin [Chow 1995b]. Kokeissa käytettiin alhaista palotehoa ja voimakasta ilmastointia. Palokammion pituus oli 4,0 m, leveys 3,0 m ja korkeus 2,8 m. Suurin kokeissa esiintynyt paloteho oli 22,9 kW ja ilman vaihtumisnopeudet tehdyissä kolmessa palokammiokokeessa olivat 32 kertaa/h, 50 kertaa/h ja 60 kertaa/h. Kokeet tehtiin ensin käyttämällä polttoaineena puuta ja toistettiin käyttämällä metanolia. 7 termoelementtiä oli sijoitettu katon korkeudelle ja 12 tasavälein kahteen pystysuoraan telineeseen, jotka olivat 300 mm katon alapuolella. Tuloksia verrattiin sekä kokeellisiin tuloksiin että kenttämalliohjelmalla laskettuihin tuloksiin. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää koneellisen ilmastoinnin vaikutusta lieskahdusta edeltävään paloon. CFASTilla laskettu kuuman kerroksen lämpötila oli huomattavasti mitattua korkeampi, suurimmillaan kaksinkertainen kokeelliseen verrattuna. Laskentatuloksista saatu huoneen keskilämpötila vastasi kokeellisia tuloksia paremmin. Ohjelmien kelpoisuuden osoittamista varten laskentatulosten ja mittaustulosten vertailua varten esitettiin kaava, jolla voidaan laskea tulosten poikkeavuutta kuvaava tunnusluku. Lasketuille ja kokeellisille tuloksille ei saatu hyvää vastaavuutta.

Chow on simuloinut pysäköintitalojen tulipaloja kolmella vyöhykemalliohjelmalla CFAST, CCFM.VENTS ja CSIRO:n yksihuonemallilla FIRECALC [Chow 1995c]. Pysäköintitalojen tilavuudet olivat $2\ 000 \text{ m}^3 - 50\ 000 \text{ m}^3$ ja korkeudet 3 m, 4 m ja 5 m. Laskennassa palotehoksi oletettiin 5 MW:n vakioehto, jonka kesto oli 60 min. CFAST katsottiin sopivaksi palosimulointiohjelmaksi, ja sillä saadut tulokset sopivat myös melko hyvin yhteen artikkelissa esitettyjen empiiristen korrelaatioiden kanssa, jotka puolestaan todettiin melko hyvin yhteensopiviksi aikaisemmin julkaistujen kokeellisten tulosten kanssa.

Chow on simuloinut CFASTilla ja kolmella muulla vyöhykemalliohjelmalla, FIRSTillä; CCFM.VENTSillä ja CSIRO:n kehittämä FIRECALCilla [Chow 1994], aikaisemmin raportoitua atriumin palokoetta [Yamana et al. 1985]. Kokeet on tehty atriumissa, jonka pituus oli 30 m, leveys 24 m ja korkeus 26,3 m. Keskimääräinen paloteho oli 1 300 kW. Artikkelissa todetaan, että atriumin yläosaan muodostuu savukerros ja vyöhykemalleja voidaan käyttää atriumin savulla täyttymisen simulointiin. Kaikilla neljällä vyöhykemalliohjelmalla saatiin melko hyvä tulos kokeellisiin arvoihin verrattuna. Erityisesti CCFM.VENTSillä saatiin hyvä tulos sekä lämpötilan että savukerroksen korkeudelle ja FIRSTillä tyydyttävä savukerroksen korkeus.

Artikkelissa esitetyssä toisessa vertailulaskennassa käytettiin Hägglundin [1992] raportointia palokoetta. Rakennus käsitti kaksi huonetta, palohuoneen (4 m × 3 m, korkeus 2,6 m) sekä hallin (5,6 m × 5,6 m, korkeus 6,1 m), johon palohuoneesta oli 2 m korkea ja 1 m leveä aukko. Kahdessa koesarjassa palohuoneen ja atriumin lattiat olivat samalla tasolla, yhdessä palohuone oli korkeammalla tasolla. Paloteho kokeissa oli 250 kW tai 560 kW. Palotilanteissa, joissa rakennuksen katossa ei ollut aukkoa, CFAST-ohjelman tulokset vastasivat hyvin koetuloksia huoneiden lämpötiloille ja kohtalaisen hyvin savupatjan paksuudelle. Muissa tilanteissa tulos oli tyydyttävä.

Collier on verrannut CFAST-ohjelmalla saatuja tuloksia kokeellisiin tuloksiin [Collier 1996]. Kolme makuuhuonetta käsittävässä asuinrakennuksessa tehtiin sarja kokeita, joista analysoitiin savukerrosten muodostuminen ja lämpötilat eri huoneissa. Laskennassa saadut tulokset vastasivat koetuloksia kohtalaisen hyvin vaihdellen eri palotilanteissa.

Fu ja Fan vertaavat CFASTilla (versio 1.6) laskettuja tuloksia kehittämällään CFAST-ohjelmaan perustuvalla mallilla laskettuihin tuloksiin sekä aikaisemmin julkaistuihin kokeellisiin tuloksiin [Fu & Fan 1996]. Uudella mallilla saadaan parempi vastaavuus koetulosten kanssa, mutta molemmissa malleissa on lämmönsiirron osuus todennäköisesti aliarvioitu.

Davis et al. ovat tutkineet kokeellisten korrelaatioiden, vyöhykemallien mm. CFAST-ohjelman sekä kahden CFD-ohjelman käytettävyyttä korkeiden tilojen palojen simuloinneissa vertaamalla laskettuja tuloksia 15 m korkeassa lentokonehallissa tehdyissä palokokeissa saatuihin tuloksiin [Davis et al. 1996]. Maksimipalotehot kokeissa olivat 500 kW ja 2,7 MW. CFAST ei soveltunut hyvin näiden palotilanteiden laskentaan. Yhteenvedossa todetaan myös, että joitakin tapauksia lukuun ottamatta CFD-mallin käytöllä ei ollut etua vyöhykemalliin verrattuna.

Luo on verrannut laskettuja tuloksia palokokeissa saatuihin tuloksiin [Luo 1997, Luo et al. 1997]. Artikkeleissa tarkastellaan kahdessa erikokoisessa palohuoneessa tehtyjä kokeita. Molempien huoneiden korkeus oli 2,4 m, pienemmän huoneen pinta-ala oli

2,4 m x 3,6 m ja suuremman 5,4 m x 3,6 m. Liekehtivissä ja lieskahtaneissa paloissa malli ennusti lämpötilat palohuoneessa sekä rajapinnan korkeuden alkupalon aikana (n. 300 s) hyvin, mutta täyden palon aikana saadut lämpötilat olivat huomattavasti korkeellisia korkeampia. Lasketut huoneiden keskilämpötilat sopivat hyvin yhteen kokeellisten tulosten kanssa, mikä vastaa yksihuoneoletusta. Kytevä palon laskentaan mallin ei katsottu olevan sopiva. Myös koneellinen ilmastointi aiheutti huomattavia eroja laskentatulosten ja mittaustulosten välille. Erityisesti CO-pitoisuus oli liian suuri koneellisen ilmastoinnin ollessa päällä ja liian pieni, kun ilmastointi oli kytketty pois.

He et al. on verrannut CFASTilla laskettuja tuloksia kokeellisiin sekä verkkomallilla laskettuihin tuloksiin [He & Beck 1997]. Kokeet tehtiin nelikerroksisessa täysimittakaavaisessa rakennuksessa, jossa palohuone oli ensimmäisessä kerroksessa. Lähellä palohuonetta olevassa käytävässä ylemmän kerroksen lämpötilan ja koetulosten yhteensopivuus oli kvalitatiivinen ja porraskuilussa sekä kauempana olevassa käytävässä huono.

5.2.2 Vertailutuloksia

Koetulosten ja CFAST-ohjelmalla laskettujen tulosten vertailussa käytettiin alla mainittuja suureita. Niiden seuraavat lukuarvot ovat liitteessä 1 (taulukko L1.1):

- ylemmän vyöhykkeen suurin lämpötila, $T_{\text{upper,max}}$ (°C)
- alemman vyöhykkeen suurin lämpötila, $T_{\text{lower,max}}$ (°C)
- vyöhykkeiden välisen rajapinnan korkeuden minimiarvo, $z_{\text{layer,min}}$ (m)
- hapen minimipitoisuus, $O_{2,\text{min}}$ (%)
- hiilidioksidin maksimipitoisuus, $CO_{2,\text{max}}$ (%)
- hiilimonoksidin maksimipitoisuus, CO_{max} (ppm)
- aika, jossa ylemmän vyöhykkeen lämpötila saavuttaa arvon 100 °C, $t_{\text{upper,100C}}$ (s)
- aika, jossa vyöhykkeen kerroksen lämpötila saavuttaa arvon 300 °C, $t_{\text{upper,300C}}$ (s)
- aika, jossa kerrosten rajapinta saavuttaa tason 1,5 m, $t_{\text{layer,1.5m}}$ (s).

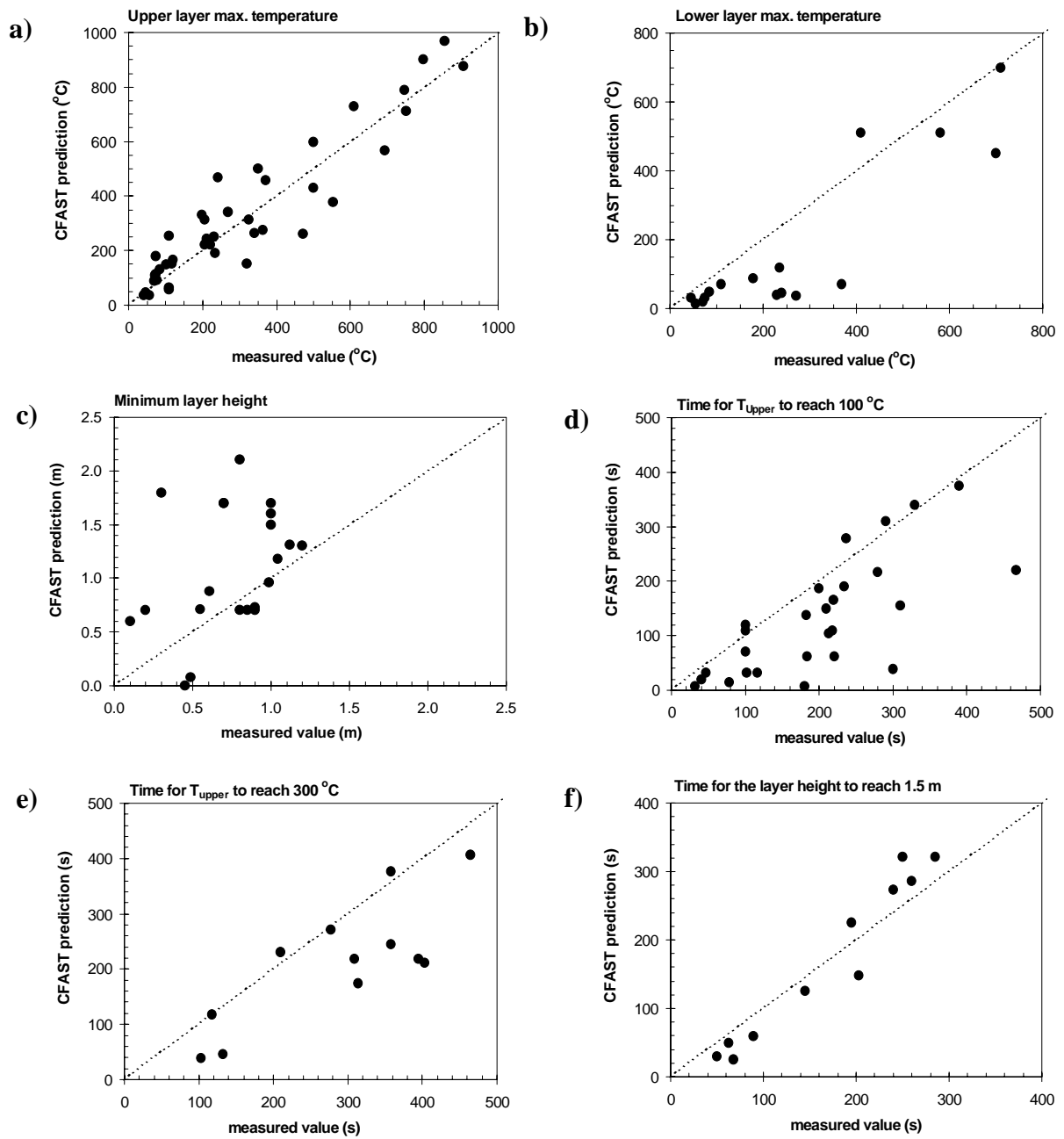
Tasapainotilanteeseen päätyneissä kokeissa (aineiston numerot 5–13) maksimiarvona käytettiin saavutettua muuttumattoman tilan arvoa.

Osa vertailulukupareista poikkeaa niin paljon muista pareista, että niiden voidaan katsoa olevan selvästi muista poikkeavia (outliers). Nämä lukuparit on merkitty liitteen 1 taulukossa L1.1 alleviivauksella ja kursivoinnilla (ilmeinen virheellinen lukema, poistettu) tai pelkällä alleviivauksella (lievempi poikkeama, otettu mukaan). Tilastollisessa poikke-

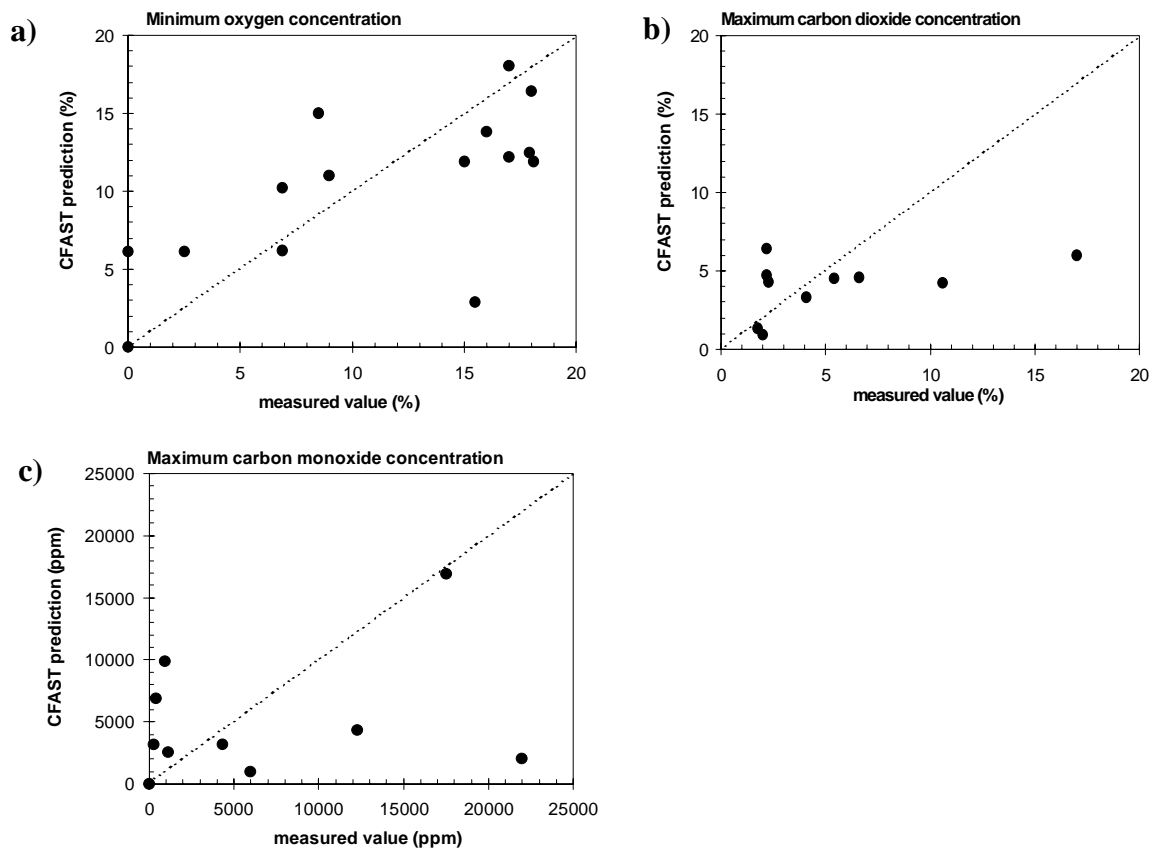
vien lukemien tarkastelussa käytettiin Mandelin *h*-tekijämenetelmää lukuarvojen keskinäisen yhdenmukaisuuden tutkimiseksi [ISO 5725-2 1994]. Tarkastelussa käytettiin CFAST-lukeman ja kokeellisen arvon erotusta. Esimerkki menettelystä on liitteessä 2. Artikkeleissa esitettyjä syitä poikkeaville havainnoille on taulukossa 2. Liitteen 1 taulukossa 2 on havaintojen tilastollisia tunnuslukuja, kun em. poikkeavat tulokset on poistettu havaintojoukosta. Havainnot ilman poikkeavia tuloksia ovat kuvissa 3 ja 4.

Taulukko 2. Syitä muista poikkeaviin havaintoihin.

Suure	Lähde nro	Selitys
<i>Tupper</i> _{max}	4 (poistettu)	CFAST-ohjelmalla laskettu arvo, 1 550 °C, on anomaalisen korkea. Tällaisten virheiden poistamiseksi ohjelman käyttäjän olisikin hyvä ottaa huomioon, että huonepaloissa lämpötila voi nousta noin 1 200 °C:n korkeudelle, mutta ei juurikaan ylemmäs.
	43 (poistettu)	CFAST-ohjelmalla laskettu arvo, 1 614 °C, on anomaalisen korkea, ks. eo.
	44 (poistettu)	CFAST-ohjelmalla laskettu arvo, 754 °C, on 580 °C mitattua arvoa, 174 °C, korkeampi. Syy lienee se, että koe oli laadittu suuren palon aikaansaamiseksi (CFAST-arvo liittyy koejärjestelyyn) mutta jostain syystä palaminen on toteutunut selvästi vähäisempänä.
	8, 16 (ei poistettu)	-
<i>Tlower</i> _{max}	ei poikk.	
<i>zlayer</i> _{min}	ei poikk.	
O _{2,min}	12 (ei poistettu)	Mitattu pienin happipitoisuus, 15,5 %, on paljon suurempi kuin CFASTin ennustama arvo, 2,9 %. Koska koe tehtiin n. 100 vuotta vanhassa rakennuksessa, tekijät arvelevat syyksi rakennuksen vuotojen vaikutusta.
CO _{2,max}	ei poikk.	Havaintojen hajonta varsin suuri
CO _{max}	ei poikk.	Havaintojen hajonta suuri
<i>tupper</i> _{100C}	28 (poistettu)	CFAST-ohjelman laskema lämpötilakäyrä ei saavuttanut 100 °C:sta.
	36 (poistettu)	Artikkelin kirjoittajat arvelevat, että mitattu lämpötila ei vastanne kovin hyvin CFAST-ohjelman laskemaa keskiarvolämpötilaa.
<i>tupper</i> _{300C}	27 (poistettu)	CFAST-ohjelman laskema lämpötilakäyrä ei saavuttanut 300 °C:sta.
	29 (poistettu)	Mitattu aika 300 °C:n ylitykseen on paljon pitempi kuin CFAST-arvo, koska hitaasti nouseva mitattu lämpötila oli n. 30 minuutin jälkeenkin vain vähän yli 350 °C.
<i>tlayer</i> _{1.5m}	25 (poistettu)	Artikkelin kirjoittajat arvelevat, että kokeessa toteutunut ventilaatio poikkeaa olennaisesti CFAST-ohjelmassa oletetusta ventilaatiotavasta.

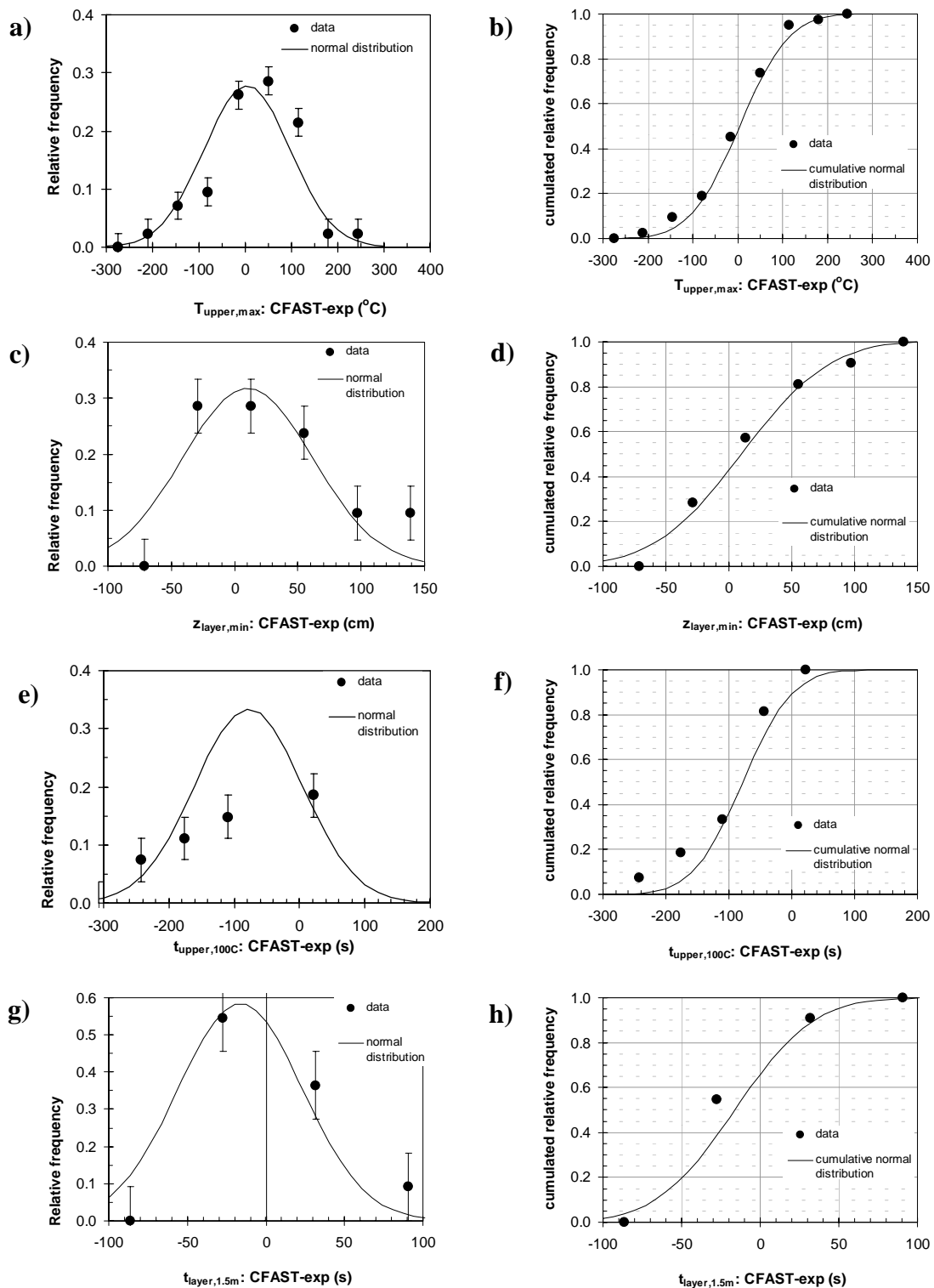


Kuva 3. Havaintoaineistoa, vaaka-akselilla mittausarvo ja pystyakselilla vastaava CFAST-tulos. Diagonaalisella katkoviivalla CFAST-arvo ja mitattu arvo ovat yhtäsuuret. Suureet: a) $T_{\text{upper,max}}$, b) $T_{\text{lower,max}}$, c) $z_{\text{layer,min}}$, d) $t_{\text{upper,100C}}$, e) $t_{\text{upper,300C}}$ ja f) $t_{\text{layer,1.5m}}$.



Kuva 4. Havaintoaineistoa, vaaka-akselilla mittausarvo ja pystyakselilla vastaava CFAST- tulos. Diagonaalisella katkoviivalla CFAST-arvo ja mitattu arvo ovat yhtäsuuret. Suureet: a) $O_{2,\min}$, b) $CO_{2,\max}$, ja c) CO_{\max} .

Havaintojen yhteensopivuutta voidaan tutkia kvantitatiivisesti tarkastelemalla CFAST-ohjelmalla lasketun arvon ja mitatun arvon erotusta joko absoluuttisena tai suhteellisena, ks. liite 1, taulukko L1.3. Erotusten tilastolliset tunnusluvut ovat liitteen 1 taulukossa L1.4. Kuvassa 5 ovat suureille $T_{\text{upper,max}}$, $z_{\text{layer,min}}$, $t_{\text{upper,100C}}$ ja $t_{\text{layer,15.m}}$ laskettujen erotusten histogrammianalyysistä saadut jakaumat. Jakaumiin on sovitettu normaalijakaumaa kuvaavat funktiot. Sovitus tehtiin sekä todennäköisyystiheydelle että kumulatiiviselle jakaumalle samanaikaisesti. Vastaavat kuvat suhteellisille erotuksille ovat liitteessä 3.



Kuva 5. CFAST-lukemien ja mitattujen lukemien erotusten jakaumat suureille $T_{upper,max}$ (a,b), $z_{layer,min}$ (c,d), $t_{upper,100C}$ (e,f) ja $t_{layer,1.5m}$ (g,h). Vasemmalla on todennäköisyystiheys ja oikealla kertymäfunktio. Virhejanat osoittavat ykkösen suuruiseen (yksi havainto) hajonnan. Käyrät ovat yhtäaikaaisesti todennäköisyystiheuteen ja kertymäfunktioon sovitettuja normaalijakaumia.

5.2.3 Vertailutulosten arviointi

Kuvista 3, 4 ja 5 voidaan arvioida CFAST-tulosten ja mitattujen tulosten yhteensopivuutta.

Ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötilojen nähdään vastaavan varsin hyvin toisiaan (kuva 3a). Kuvista 5a ja 5b voidaan tarkastella, miten CFAST-tulosten ja mittausarvojen erotukset ovat hajaantuneet nollan ympärille. Tarkasteltaessa aikoja, joissa ylemmän kerroksen lämpötila saavuttaa 100 °C (kuva 2d) tai 300 °C (kuva 2e), CFAST-ohjelman laskemat arvot ovat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta mittaustuloksia pienempiä. Kuvissa 5e ja 5f tämä näkyvä pisteiden painottumisena nollan vasemman puolelle (pisteiden jakauma näyttää poikkeavan selvästi normaalijakaumasta). Alemman vyöhykkeen lämpötiloissa (kuva 3b) CFAST-arvot ovat yhtä lukuun ottamatta mittaustuloksia pienempiä.

Vyöhykkeiden välisen rajapinnan korkeuksissa CFAST-arvot ovat lähes poikkeuksetta kokeellisesti havaittuja arvoja suurempia, eli CFAST-ohjelma näyttää ennustavan pienemmän savupatjan paksuuden kuin mitä kokeissa on havaittu (kuva 3c). Kuvissa 5c ja 5d tämä näkyy keskiarvon siirtymisenä nollan suhteen oikealle. CFAST- ja mittaustulokset koskien aikaa, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu 1,5 m:n korkeudelle, vastaavat toisiaan hyvin (kuva 3i). Jakaumakuvista 3g ja 3h päätellen CFAST-ennusteet ovat keskimäärin hieman mitattuja aikoja pienempiä.

Kaasupitoisuuksia esittävässä kuvissa 4d, 4e ja 4f hajonta CFAST-tulosten ja mittaustulosten yhtäsuuruutta kuvaavan diagonaalisuoran ympärillä on varsin voimakasta ja satunnaisen näköistä.

Mittaustulokset sisältävät huomattavan määrän satunnaisvaihtelua ja lisäksi CFAST-ohjelman ennustukset sisältävät satunnaishajontaa siksi, että monet niiden tuloksiin vaikuttavat tekijät, kuten lämmönsiirto seiniin ja savun läpi, materiaaliparametrit, ja monet alimalleista (esim. palopatsasmalli), sisältävät satunnaista vaihtelua. Siksi edellä esitettyihin lukuihin liittyvä satunnaisvaihtelu on suurta ja se on otettava huomioon, kun pyritään arvioimaan, poikkeavatko koetulokset ja CFAST-ohjelman tulokset toisistaan.

Liitteessä 4 on annettu vertailuaineiston tilastollisen analysoinnin tuloksia: taulukossa L4.1 ovat CFAST-lukemien ja kokeista saatujen tulosten erotuksen keskiarvot sekä varmuusvälit ja taulukossa L4.2 on CFAST-tulosten ja koetulosten erotuksen arviointi, kun hypoteesinä on, että erotus on nollasta poikkeava.

Tilastollinen analyysi tuloksena CFAST-ohjelman tulosten ja kokeellisten tulosten yhteensopivuutta voidaan luonnehtia kvantitatiivisesti, ks. taulukko 3.

Taulukko 3. Vertailusuureiden tilastollisen analysoinnin tuloksia.

Parametri	Keskiarvo ja 90 %:n varmuusväli	Onko CFAST-tuloksella ja mitatulla tuloksella merkittävä ero?
Ylemmän vyöhykkeen maksimi-lämpötila, $T_{upper,max}$	$T_{upper,max,CFAST} - T_{upper,max,mitattu} = 17 \text{ °C} \pm 92 \text{ °C}$	ei ole
Alemman vyöhykkeen maksimi-lämpötila, $T_{lower,max}$	$T_{lower,max,CFAST} - T_{lower,max,mitattu} = -53 \text{ °C} \pm 143 \text{ °C}$	on
Vyöhykkeiden rajapinnan minimi-korkeus, $z_{layer,min}$	$Z_{layer,min,CFAST} - z_{layer,min,mitattu} = 0,33 \text{ m} \pm 0,24 \text{ m}$	ei ole
Happipitoisuus, $O_{2,min}$	$O_{2,min,CFAST} - O_{2,min,mitattu} = -1,0 \% \pm 3,4 \%$	ei ole
Hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvo, $CO_{2,max}$	$CO_{2,max,CFAST} - CO_{2,max,mitattu} = -1,4 \% \pm 2,9 \%$	ei ole
Hiilimonoksidipitoisuuden maksimiarvo, CO_{max}	$CO_{max,CFAST} - CO_{max,mitattu} = -1 \text{ 500 ppm} \pm 5 \text{ 200 ppm}$	on
Aika, jossa ylemmän vyöhykkeen lämpötila saavuttaa arvon 100 °C, $t_{upper,100C}$	$t_{upper,100C,CFAST} - t_{upper,100C,mitattu} = -1 \text{ min } 8 \text{ s} \pm 49 \text{ s}$	on
Aika, jossa ylemmän vyöhykkeen lämpötila saavuttaa arvon 300 °C, $t_{upper,300C}$	$t_{upper,300C,CFAST} - t_{upper,300C,mitattu} = -1 \text{ min } 14 \text{ s} \pm 82 \text{ s}$	on
Aika, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu tasolle 1,5 m, $t_{layer,1.5m}$	$t_{layer,1.5m,CFAST} - t_{layer,1.5m,mitattu} = 1,6 \text{ s} \pm 77 \text{ s}$	ei ole

Eräs seikka, jonka CFAST-ohjelman käyttökokemuksen perusteella voidaan odottaa olevan ongelmallista, on hyvin korkeiden tilojen tulipalon simulointi. Tässä raportissa esitetty aineisto sisältää pääosin matalahkoja tiloja koskevia tuloksia. Hyvin korkeita tiloja koskevia koetuloksia on olemassa vähän ja usein näissä kokeissa käytetty paloteho on hyvin pieni. Esimerkiksi 15 m:n korkuisessa hallissa tehdyissä kokeissa [Davis et al. 1996] palotehon suhde hallin kokonaistilavuuteen oli hyvin pieni, eli noin $5 - 25 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^3$ (esim. 100 W:n teholla palava suurehko kynttilä palokammion suuruudessa ($2,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m} \times 3,6 \text{ m}$) tilassa vastaa arvoa $5 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^3$). Tulokset, joita tämän raportin aineistossa on n. 5–6 m:n korkuisista tiloista, eivät poikkea muista n. 2,5 m:n korkuisia tiloja koskevista tuloksista.

5.2.4 Laskettujen ja kokeellisten tulosten vastaavuudesta

Ylemmän vyöhykkeen suurin lämpötila ja aika, jossa vyöhykkeiden rajapinta on laskeutunut tasolle 1,5 m, ovat suureita, joissa CFAST-tulokset ja mitatut tulokset vastaavat toisiaan varsin hyvin (ks. kuvat 3a ja 3f). Tässä luvussa analysoidaan tilastollisesti tätä vastaavuutta.

Tarkastelussa on pidetty CFAST-arvoja selittävinä muuttujina ja mittaustuloksia selitettävänä muuttujina. Siksi tuloksista voidaan arvioida, millaisia arvoja ohjelmalla lasketut arvot voivat vastata, ja lisäksi, miten suuri epävarmuus ohjelman tuottamaan tulokseen voi liittyä. Alla CFAST-tuloksiin viitataan alaindeksillä "CFAST" ja mitattuihin tuloksiin alaindeksillä "MEAS".

Lineaarisen regression tuloksena saadaan alla esitetyt tulokset ylemmän vyöhykkeen suurimmalle lämpötilalle, $T_{\text{upper,max}}$, ja ajalle, jossa vyöhykkeiden rajapinta on laskeutunut tasolle 1,5 m, $t_{\text{layer,1.5m}}$.

Lämpötilalle $T_{\text{upper,max}}$ käytettiin regressiomallia, jossa vakioparametri on asetettu nol-laksi. Pienimmän neliösumman sovitus antaa tuloksen [Baroudi & Kokkala 1993]

$$T_{\text{upper,max,meas}} = 0,94 \cdot T_{\text{upper,max,CFAST}} \quad (26)$$

missä regressiokerroin on 95 % varmuudella 0,87–1,01. Mallin selitysaste on $R^2 = 0,86$.

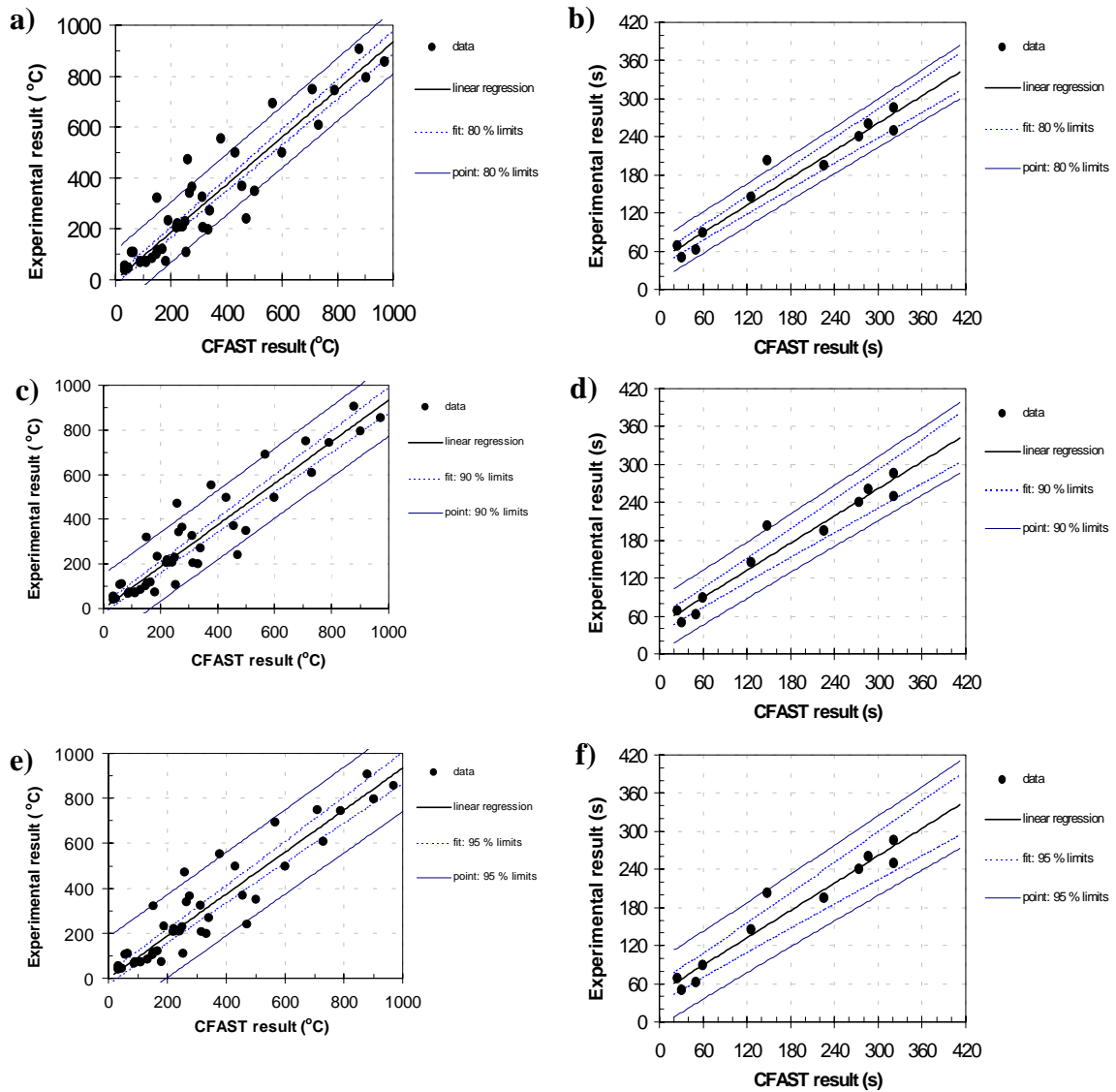
Ajalle $t_{\text{layer,1.5m}}$ käytettiin kaksiparametrista regressiomallia. Pienimmän neliösumman sovitus antaa tuloksen

$$t_{\text{layer,1.5,meas}} = 0,72 \cdot t_{\text{layer,1.5,CFAST}} + 46 \text{ s} \quad (27)$$

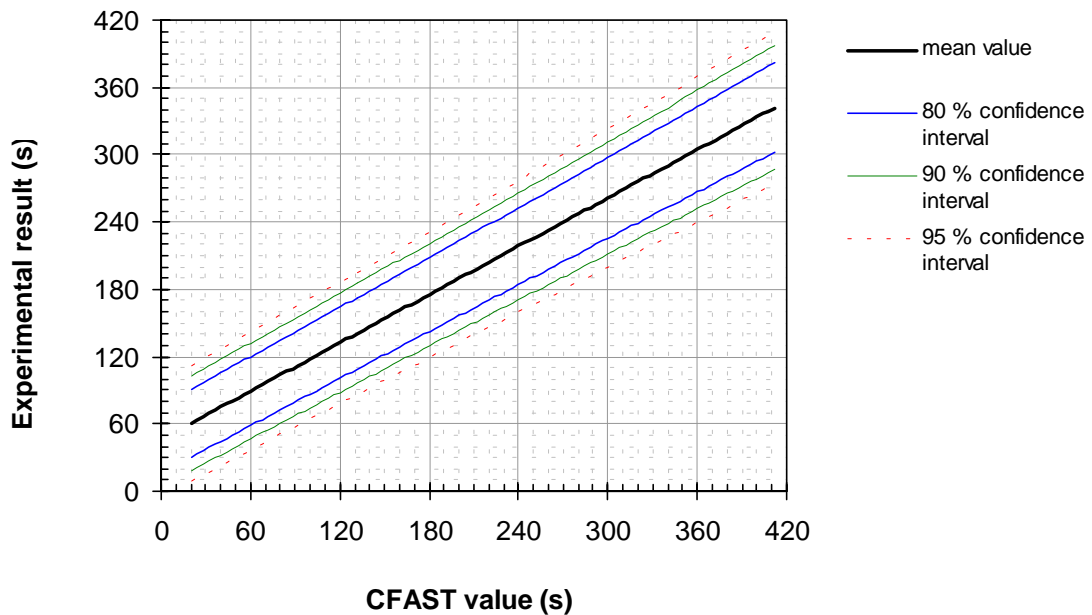
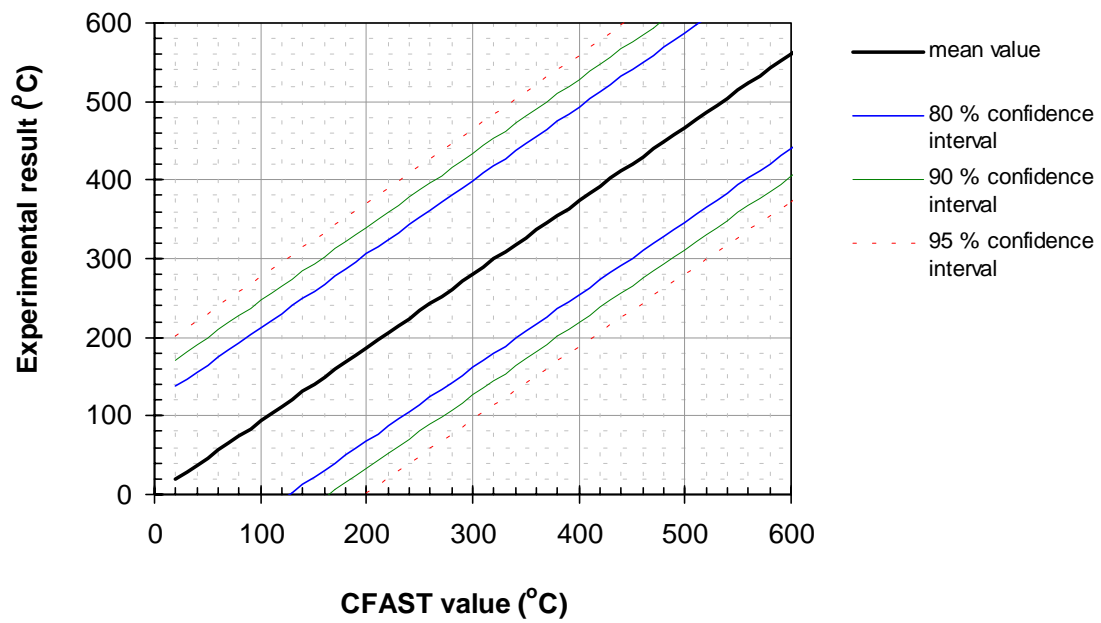
missä 95 %:n varmuusvälit ovat 0,59–0,85 regressiokertoimelle ja 19–73 s vakio-termille. Mallin selitysaste on $R^2 = 0,94$.

Regressiomalliin liittyy kaksi varmuusväliä. Niistä ensimmäinen kuvaa sovituksen epävarmuutta eli sitä, miten malli kuvaa pistejoukkoa. Toinen on yksittäisen pisteen arvoon liittyvä epävarmuus, joka kertoo, kuinka tarkasti voidaan yhden selittävän muuttujan arvon perusteella ennustaa, mikä on vastaava selitettävän muuttujan arvo. Yksittäisen pisteen varmuusväli on mallin varmuusväliä leveämpi. Sovitukset ja eri varmuustasoja vastaavat mallin ja yksittäisen pisteen varmuusvälit on piirretty kuviin 6 a–f. Kuvassa 7 esitetään regressioanalyysin tulos diagrammeina, joista voi kuvata 6 tarkemmin lukea CFAST-tulosta vastaavan kokeellisen tuloksen. Jos halutaan arvioida CFAST-tulosta käyttäen, minkä suuruinen kokeellinen lämpötila $T_{\text{upper,max}}$ olisi, ovat eri varmuustasoja vastaavat varmuusvälit regressiosuoran ympärillä likimääräisesti seuraavat:

± 120 °C (80 %), ± 150 °C (90 %) ja ± 180 °C (95 %). Ajalle $t_{\text{layer},1.5\text{m}}$ vastaavat arvot ovat: ± 30 s (80 %), ± 40 s (90 %) ja ± 50 s (95 %).



Kuva 6. Regressioanalyysi, ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötila (kuvat a, c, ja e vasemmalla puolella) ja aika, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu tasolle 1,5 m (kuvat b, d ja f oikealla puolella). Yhtenäiset viivat kuvaavat yksittäiseen pisteeseen liittyvää epävarmuutta ja katkoviivat mallin epävarmuutta. Varmuustasot ovat: ylimmät kuvat 80 %, keskimmäiset kuvat 90 % ja alimmat kuvat 95 %.



Kuva 7. Diagrammit CFAST-tulosten ja kokeellisten tulosten vastaavuudesta varmuusväleinen: a) ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötila ja b) aika, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu tasolle 1,5 m.

6. CFAST-ohjelman dokumentointi

Mallin dokumentoinnin arvioinnissa seurattiin ISO-suosituksen [ISO/TR 13387 1999] ohjeita. Arvioinnin mukaan CFAST-ohjelman dokumentointi on riittävän hyvä.

6.1 Mallin tekniset perusteet

Mallin tekniset perusteet on dokumentoitu viitteessä [Peacock et al. 1993a]. Viitettä [ISO/TR 13387 1999] mukailten dokumentin sisältöä voidaan tarkastella seuraavasti:

- a. mallitettavan palotilanteen tai mallin kuvaus: mallin kuvaus, luku 1,
- b. mallin soveltuvuuden tarkastelua: s.1–3,
- c. mallin perustana olevien ilmiöiden ja fysiikan lakien kuvaus: luku 2,
- d. mallin sisältämät tärkeimmät yhtälöt: luvut 2 ja 3,
- e. mallin pääolettamukset ja rajoitukset: kohta 1.7,
- f. kuvaus käytetyistä matemaattisista menetelmistä ja laskenta-algoritmeista sekä viitteet tietolähteisiin: on,
- g. tärkeimpien algoritmien tarkkuus ja mahdollinen riippuvuus tietokoneen suorituskyvystä: ei ole (ei kuitenkaan ole suuri puute),
- h. luettelo tarvittavista apuohjelmista ja lähtötiedoista: kuvattu käyttäjän oppaassa,
- i. luettelo tietokannoista sekä niiden alkuperästä, sisällöstä ja käytöstä: kuvattu käyttäjän oppaassa,
- j. mallin arvioinneissa saadut tulokset: luku 5,
- k. viitteet mallia käsitteleviin katsauksiin, tehtyihin analyttisiin testeihin, vertailutesteihin, kokeelliseen kelpoisuuden osoittamiseen ja ohjelmakoodin tarkastukseen: luku 5.

6.2 Käyttäjän opas

Käyttäjän opas [Portier et al. 1992] sisältää ISO-suosituksen [ISO/TR 13387 1999] mukaiset asiat seuraavasti:

- a. käytön kannalta riittävän tarkka ohjelman kuvaus: ei ole
- b. tärkeimpien menetelmien ja proseduurien kuvaus: sisältyy käyttöliittymän (CEDIT) osalta

- c. laitteistovaatimukset: s. 4
- d. asennusohjeet: s. 6
- e. tiedot ohjelmointikielestä, käyttöjärjestelmästä ja ohjelmaversiosta: s. 1–2, ohjelmaversio ja käyttöjärjestelmä
- f. lähtötietojen hankkiminen ja syöttörutiinit: luku 3, syöttörutiinit (CEDIT)
- g. pieniä muutoksia sisältävien tehtävien peräkkäinen käsittely: mukana käyttöliittymässä
- h. oletusarvot tai niitä koskevat yleiset säännöt: luku 6
- i. luettelo ohjelmiston sisältämistä muuttujien arvoista: ei ole
- j. ohjelmistoon liittyvien lähtö-, tulos- ja tietokantatiedostojen sisältö ja sijainti: luku 6, liitteet C ja D
- k. luettelo käyttöjärjestelmäkomennoista: ei ole
- l. ohjelman tulostus, grafiikkanäytöt ja piirtorutiinit: kohta 4.3 ja luku 5
- m. ohjeet tyypillisen sovelluksen suoritusajan arviointiin käytettävissä olevalla tietokonejärjestelmällä: ei ole
- n. valmiiksi laskettuja esimerkkitapauksia, joiden avulla voidaan todeta ohjelman toimivan oikein: kohta 2.5 ja liite A
- o. luettelo virhetilanteissa tarvittavista toimenpiteistä: ei ole
- p. ohjeet laskentatulosten oikeellisuuden arvioimiseksi: ei ole.

7. Yhteenveto

CFAST-ohjelman kelpoisuus tarkoittaa sitä, miten hyvin ohjelma pystyy tuottamaan todellisuutta vastaavia ennusteita. Tämä puolestaan riippuu siitä, miten hyvin ohjelmaan sisällytetyt fysikaaliset mallit kuvaavat mallinnettuja erillisilmiöitä, ja mallien säilymlakien ohjaaman yhteistoiminnan kyvystä kuvata koko tarkastellun systeemin toimintaa. Kelpoisuuskysymystä lähestytään tässä raportissa kahdella tavalla. Ensimmäinen käytetty tapa on ohjelman käyttämien yksittäisten mallien sisäisten rajoitusten tarkastelu, jossa käsitellään mm. palopatsasmallien pätevyysaluetta, malleissa tehtyjä yksinkertaistuksia tai säilymlakeja kuvaavien yhtälöiden johtamisessa tehtyjä oletuksia. Toisessa lähestymistavassa verrataan CFAST-ohjelman antamia tuloksia koetuloksiin. Yksityiskohtaisemmat yhteenvedot näihin kysymyksiin liittyvistä tuloksista on annettu kohdissa 7.1 ja 7.2.

Käytännössä laskelmia tekevissä laitoksissa ja yrityksissä kertyy kokemuksen mukana tietoa, joista ko. tahot voivat muodostaa sisäisiä ohjeistuksia sille, miten erilaisten rakennusten ja tilojen laskentatapauksissa tulisi menetellä. Tällaisissa ohjeissa voidaan esim. jakaa tilat niiden mittojen mukaan erilaisiin tapauksiin, joista yksinkertaisimmat voidaan suorittaa rutiinityönä mutta erikoisempien tilojen laskennassa tulee tehdä lisälaskelmia ja muita tarkistuksia (ks. kohta 7.3).

7.1 Fysikaalisiin alimalleihin liittyvät kelpoisuuden rajat

Palopatsaiden käyttäytymistä kuvaavista empiirisistä malleista voidaan johtaa seuraavat rajoitukset CFAST-ohjelman käytön pätevyysalueelle:

Tekijä	Rajoitus¹⁾	Lähde
huoneen geometria: liekin osuminen seiniin	$W_{\min}/H > 0,4$	Kohta 2.2.3, kaava (8)
paloteho ja palava alue: nostemallin toimivuusalue	$220 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}} \leq \frac{\dot{Q}}{D^{5/2}} \leq 2\,200 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}}$	McCaffreyn palopatsasmalli, kohta 2.2.1.2, kaava (3b)
paloteho: liekin osuminen kattoon	$0,33 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}} \leq \frac{\dot{Q}}{H^{5/2}} \leq 55 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{5/2}}$	McCaffreyn palopatsasmalli
Paloteho ja alkutilanteen vertikaalinen lämpötilaero	$\dot{Q}_H^{*-1} \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right)^{3/2} \leq 144$	johdettu kohdan 2.2.2 kaavasta (6)

¹⁾ Tässä symboleilla on seuraavat merkitykset ja yksiköt: W_{\min} (m) on huoneen minimileveys, H (m) on huoneen korkeus, D (m) on palavan pinta-alan efektiivinen halkaisija, \dot{Q} on paloteho, \dot{Q}_H^* on huoneen korkeudella H dimensiottomaksi muunnettu paloteho (vrt. kaava (1)), ΔT tilan ala- ja yläpintojen (lattian ja katon) lämpötilaero alussa ja T_0 on ympäristön lämpötila palolähteen korkeudella.

Myös vyöhykemallissa käytetyn palotehomallin (esim. t^2 -malli, $\dot{Q} = \dot{Q}_0 (t/t_0)^2$) kasvunopeuteen liittyy rajoituksia. Syynä tähän on se, että jos palo kasvaa hyvin nopeasti, ei palotilaan muodostu vyöhykemallien oletamaa homogeenisten kerrosten rakennetta, vaan tilanne on lieskahdukseen asti olennaisesti dynaaminen ja epähomogeeninen. Eräs esimerkki tästä on eräissä suuren mittakaavan palokokeissa havaittu savupatjan aaltoileminen. Kvantitatiivista analyysia asiasta ei tähän raporttiin ole tehty.

Olellaisin seikka, joka tuottaa epävarmuutta simuloitaessa tulipalon kehittymistä korkeissa rakennuksissa, on palopatsasmallin lisäilman laskenta. Epävarmuus johtuu siitä, että koeaineisto, jonka perusteella palopatsasmallit on kehitetty, ei sisällä korkeita tiloja koskevia tuloksia. Siksi mallit pätevät hyvin pienillä korkeuksilla, mutta niiden *kelpoisuudesta korkeissa tiloissa ei tällä hetkellä ole kvantitatiivista vertailutietoa*. Tulevaisuudessa (ehkä jo muutamien seuraavien vuosien aikana) koeaineistoa saataneen riittävästi, että ongelma voidaan ratkaista (ks. esim. viite [Chow *et al.* 1998/1999]). Lisäilman laskentaan liittyviä ongelmia havainnollistetaan liitteessä 5.

7.2 Ohjelman tulosten ja koetulosten vertailu

CFAST-ohjelman tuloksia verrattiin koetuloksiin yhdeksää parametria käyttäen. Vertailun tulokset ovat:

- CFAST-ohjelmalla lasketut ylemmän vyöhykkeen suurimmat lämpötilat vastaavat varsin hyvin mitattuja arvoja. Vastaavuutta voidaan kuvata kvantitatiivisesti regressiokaavalla $T_{\text{upper,max,meas}} = 0,94 \cdot T_{\text{upper,max,CFAST}}$. Jos halutaan arvioida CFAST-tulosta käyttäen, minkä suuruinen kokeellinen tulos olisi, 80 %:n varmuudella tulos voi olla noin ± 120 °C:n päässä lasketusta arvosta (suurimmalla varmuustasolla vastaavat arvot ovat n. ± 150 °C (90 %) ja n. ± 180 °C (95 %)).
- Lasketut ja mitatut ajat, jossa vyöhykkeiden rajapinta on laskeutunut tasolle 1,5 m, vastaavat toisiaan hyvin. Regressiomalli on $t_{\text{layer,1.5,meas}} = 0,72 \cdot t_{\text{layer,1.5,CFAST}} + 46$ s. Yksittäisen pisteen varmuusvälit regressiosuoran ympärillä ovat likimääräisesti seuraavat: ± 30 s (80 %), ± 40 s (90 %) ja ± 50 s (95 %).
- CFAST-ohjelmalla lasketut ajat, joissa ylemmän vyöhykkeen lämpötila saavuttaa 100 °C tai 300 °C, ovat lähes poikkeuksetta mitattuja aikoja lyhyempiä, eli CFAST-tulos poikkeaa turvalliseen suuntaan.
- Vyöhykkeiden rajapinnan minimikorkeuden CFAST laskee suuremmaksi, kuin mitä mittauksissa havaittiin sen olevan. CFAST-ohjelman laskema arvo poikkeaa siis turvattomampaan suuntaan koetuloksista.

- CFAST-ohjelmalla lasketut kaasupitoisuuksien ääriarvot ($O_{2,\min}$, $CO_{2,\max}$ ja CO_{\max}) eivät juurikaan vastaa mitattuja pitoisuuksia. Syynä tähän lienevät ohjelman ja syöttötietojen puutteellisuudet sekä koetulosten epävarmuus (pistemäinen mittaus, tiloissa esiintyvät vuodot, jne.).

7.3 Esimerkkejä asiantuntija-arvioon perustuvista ohjeista

Huoneen mittoja koskevia rajoituksia voidaan esittää seuraavasti [Lehtimäki et al. 1997]:

	Hyväksyttävä	Vaatii erityistarkastelua	Ei hyväksyttävä
$(L/W)_{\max}$	$L/W < 3$	$3 < L/W < 5$	$L/W > 5$
$(L/H)_{\max}$	$L/H < 3$	$3 < L/H < 6$	$L/H > 6$
$(W/H)_{\min}$	$W/H > 0,4$	$0,2 < W/H < 0,4$	$W/H < 0,2$

Tässä L = huoneen pituus, W = huoneen leveys ja H = huoneen korkeus.

Jos huonetila katsotaan liian pitkänomaiseksi tai korkeaksi, voidaan tila jakaa vaaka- ja pystysuunnissa osiin, jotka lasketaan erikseen. Tällaisen menettelyn toimivuus on parempi vaaka- kuin pystysuunnassa.

Yllä mainitut rajoitukset perustuvat erään japanilaisen tutkijan eri vyöhykemalleja käyttäen tekemään työhön. Rajoitukset olivat esillä ISON työryhmässä mutta jäivät pois sen raporteista, koska niiden johtamiseksi tehtyä tutkimusta ei ole dokumentoitu. Julkaistussa kirjallisuudessa ei ole esitetty vastaavia arvioita.

Lähdeluettelo

Alpert, R. L. 1972. Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors. *Fire Technology*, 8, s. 181–195.

Baroudi, D. ja Kokkala, M. 1993. *Statistical Methods for Fire Testing*. Espoo: Nordtest. 74 s. (NT Techn Report 221.)

Bailey, J. L., Jones, W. W. , Tatem, P. A. ja Forney, G. P. 1998. Development of an Algorithm to Predict Vertical Heat Transfer Through Ceiling/Floor Conduction. *Fire Technology*, Vol. 34, s. 139–155.

Björkman, J. ja Keski-Rahkonen, O. 1996. Plumes and Jets. Teoksessa: Cox, G., Curtat, M., Di Blasi, C. ja Kokkala, M. (eds.). *Reaction to fire of construction products, Area B: Fire modelling*. European Commission Directorate General XII: Science Research and Development. CI/SIB (K4). s. 421–447.

Braun, E., Darren, L., Jones, W., Tatem, P., Carey, R. ja Bailey, J. 1992. Comparison of Full Scale Fire Tests and a Computer Fire Model of Several Smoke Ejection Experiments. NISTIR 4961, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 39 s.

Chow, W. K. 1994. A Short Note on the Simulation of the Atrium Smoke Filling Process Using Fire Zone Models. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 12, s. 516–528.

Chow, W. K. 1995a. A Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process. *Fire Safety Journal*, Vol. 25 , s. 337–353.

Chow, W. K. 1995b. Use of Zone Models on Simulating Compartmental Fires with Forced Ventilation. *Fire and Materials*, Vol. 19, s. 101–108.

Chow, W. K. 1995c. Simulation of Car Park Fires Using Zone Models. *Journal of Fire Protection Engineering*. Vol.7, nro 2, s. 65–74.

Chow, W. K. 1995d. Use of Computational Fluid Dynamics for Simulating Enclosure Fires. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 13, s. 300–334.

Chow, W. K. 1996a. Multi-Cell Concept for Simulating Fires in Big Enclosures Using a Zone Model. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 14, s. 186–198.

Chow, W. K. 1996b. Performance of Sprinkler in Atria. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 14, s. 466–488.

Chow, W. K., Fong, N. K., Cui, E., Ho, P. L., Wong, L. T., Huo, R., Fan, W., Li, Y ja Yuan, L. 1998/1999. PolyU/USTC atrium: a full-scale burning facility – preliminary experiments. *Journal of Applied Fire Science*, Vol. 8, nro 3, s. 229–241.

Collier, P. C. R. 1996. Fire in a Residential Building: Comparisons Between Experimental Data and a Fire Zone Model. *Fire Technology*, Third Quarter, s. 195–218.

Cooper, L. Y. 1996. Calculation of the Flow Through a Horizontal Ceiling/Floor Vent. NISTIR 89-4052, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

Davis, W. D., Notarianni, K. A. ja McGrattan, K. B. 1996. Comparison of Fire Model Predictions with Experiments Conducted in a Hangar with a 15 Meter Ceiling. NISTIR 5927, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 44 s. + liitt. 15 s.

Delichatsios, M. A. 1995. Air Entrainment Into Buoyant Jet Flames And Pool Fires: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, S. 2-20–2-31.

Dembsey, N. A., Pagni, P. J. ja Williamson R. B., 1995. Compartment Fire Experiments: Comparison with Models. *Fire Safety Journal*, Vol. 25, s. 187–227.

Drysdale, D. 1999. *An Introduction to Fire Dynamics*. Toinen painos. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 451 s. ISBN 0-471-97290-8

Friedman, R. 1992. International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineers*, Vol. 4, nro. 3, s. 81–92.

Fu, Z. ja Fan, W. 1996. A Zone-type Model for a Building Fire and Its Sensitivity Analysis. *Fire and Materials*, Vol. 20, s. 215–224.

He, Y. ja Beck, V. 1997. Smoke Spread Experiment in a Multi-Storey Building and Computer Modelling. *Fire Safety Journal*, Vol. 28, s. 139–164.

Heskestad, G. 1983. Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames. *Fire Safety Journal*, Vol. 5, s. 103–108.

Heskestad, G. 1989. Note on Maximum Rise of Fire Plumes in Temperature-stratified Ambients. *Fire Safety Journal*, Vol. 15, s. 271–276.

Heskestad, G. 1995. Fire Plumes. Teoksessa: Nenno et al. (eds.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd ed. Quincy, MA: National Fire Association, and Boston, Mass: Society of Fire Protection Engineers. S. 2-9-2-19.

Hostikka, S. 1997. Palopatsasmallit tulipalon simuloinnissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto. 79 s. + liitt. 8 s.

Hägglund, B. 1992. Comparing fire models with experimental data. FOA Report C 20864-2.4. Försvarets Forskningsanstalt, Ruotsi. 39 s.

ISO 5725-2: 1994(E). Accuracy (trueness and precision) of Measurement Methods and Results – Part 2: Basic Method for the Determination of Repeatability and Reproducibility of a Standard Measurement Method. 1. Painos. International Organization for Standardization, Geneve, Sveitsi. 42 s.

ISO/TR 13387, Part 3. 1999. Fire Safety Engineering. Fire Safety Engineering-Assessment and Verification of Mathematical Fire Models. International Organization for Standardization, Geneve, Sveitsi.

Keski-Rahkonen, O. 1987. Tulipalojen numeerinen simulointi I. Palontorjuntatekniikka, Nro 4, s. 134–136.

Lehtimäki, S. ja työryhmä. 1997. Palotekninen erityissuunnittelu vyöhykemalleja käyttäen. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö. 58 s. + liitt. 16 s. (Tekniikka opastaa 12.)

Luo, M. 1997. One Zone or Two Zones in the Room of Fire Origin During Fires? The Effects of the Air-handling System. Journal of Fire Sciences, Vol. 15, s. 240–260.

Luo, M., He, Y. ja Beck, V., 1997. Application of Field Model and Two-zone model to Flashover Fires in a Full-scale Multi-room Single Level Building. Fire Safety Journal, Vol. 29, s. 1–25.

Luo, M. ja He, Y. 1998. Verification of fire models for fire safety system design. Journal of Fire Protection Engineering. Vol. 9, nro. 2, s. 1–13.

McCaffrey, B. J. 1979. Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results. National Bureau of Standards, NBSIR 79-1910, Washington, D.C.

McCaffrey, B. J. 1983. Momentum Implications for Buoyant Diffusion Flames. Combustion and Flame, Vol. 52. s. 149–167.

Morton, B. R., Taylor, G. I. ja Turner, J. S. 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proceedings of the Royal Society. London. A234. S. 1–23.

Mowrer, F. W. ja Gautier, G. P. 1999. A Comparison of Four Zone Fire Models used in Nuclear Safety Studies. Interflam '99, June 15–July 1, 1999, Edinburgh, Scotland. Proceedings. Interscience Communications Ltd, London, England. S 1093–1104.

Nakaya, I., Tanaka, T. ja Yoshida, M. 1986. Doorway Flow Induced by a Propane Fire. Fire Safety Journal, Vol. 10, s. 185–195. Viite Julkaisussa.

Peacock, R. D., Forney, G. P., Reneke, P. A., Portier, R. W. ja Jones, W. W. 1993a. CFAST, The Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport. NIST Technical Note 1299. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA. 246 s.

Peacock, R. D., Jones, W. W. ja Bukowski, R. W. 1993b. Verification of a Model of Fire and Smoke Transport. Fire Safety Journal, Vol. 21, nro 2, s. 89–129.

Portier, R. W., Reneke, P. A., Jones, W. W. ja Peacock, R. D. 1992. A User'sguide For CFAST Version 1.6. NISTIR 4985. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 101 s.

Quintiere, J. G. 1996. Growth of Fire in Building Compartments, ASTM/NBS Symposium Fire Standards and Safety. Special Technical Publication 614, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1996. S. 131–167.

Rockett, J. A. 1995. Zone Model Plume Algorithm Performance. Fire Science and Technology, Vol. 15, nrot 1 & 2, s. 1–16.

Steckler, K. D. Quintiere, J. K. ja Rinkinen, W. J. 1982. Flow Induced By Fire in a Compartment. National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD NBSIR 82-2520; 101 p. July 1982, Haifa, Israel, Combustion Institute, Pittsburgh, PA. S. 913–920.

Yamana, T. ja Tanaka, T. 1985. Smoke Control in Large Scale Spaces (Part 2: Smoke control experiments in a large scale space). Fire Science and Technology, Vol. 5, nro 1, s. 41–53.

Zukoski, E. E. 1995. Properties of Fire Plumes. Teoksessa: Cox, G. (ed.). Combustion Fundamentals of Fire. London: Academic Press Limited. S. 101–219.

Taulukko L1.1. Vertailusuureiden lukuarvot. ”EXP” tarkoittaa koetulosta ja ”CFAST” CFAST-ohjelman antamaa arvoa.

n:o	$T_{upper,max}$ (°C)		$T_{lower,max}$ (°C)		$z_{layer,min}$ (m)		$O_{2,min}$ (%)		$CO_{2,max}$ (%)		CO_{max} (ppm)		$t_{upper,100C}$ (s)		$t_{upper,300C}$ (s)		$t_{layer,1.5m}$ (s)	
	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST	EXP	CFAST
1	855	970	580	510	0.80	0.70	0.01	6.1	17.0	6.0	22000	2000	290	310	358	245	250	321
2	745	790	410	510	0.85	0.70	6.9	10.2	10.6	4.2	6000	1000	330	340	358	377	285	321
3	750	710	710	700	0.20	0.70							100	120				
4	<u>810</u>	<u>1550</u>	700	450	0.10	0.60							100	70				
5	230	250	70	40	1.00	1.50							100	110				
6	75	90	30	30	1.20	1.30												
7	45	45	24	30	0.90	0.70												
8	240	470	75	45	0.70	1.70	17.9	12.5	2.3	4.3			200	187	403	212	195	226
9	70	110	21	19	1.00	1.60	18.0	16.4					467	220			240	273
10	55	35	21	15	1.00	1.70											260	286
11	40	35			0.70	1.70												
12	270	340	40	37	0.30	1.80	15.5	2.9	2.0	0.9	0.8	0.8	390	375				
13	110	65	85	70	0.80	2.10	20.9	20.4					210	150	309	218		
14	221	223																
15	341	265																
16	472	260																
17	234	189																
18	364	276																
19	553	378																
20	206	221											79	14				
21	74	179															89	59
22	326	312											32	7	118	118		
23	109	253											180	7.2			63	50
24																		
25	693	566	368	71	0.61	0.88							47	32	209	230	<u>74</u>	<u>207</u>
26	500	430			0.55	0.71	8.5	15					234	191	277	271	68	25

Taulukko L1.1. Jatkoa.

27	320	151			0.49	0.08							237	279	<u>316</u>	∞	145	126
28	108	57			0.45	0.00							<u>324</u>	∞			203	148
29	370	457	84	48	1.12	1.31							102	31	<u>512</u>	<u>90</u>		
30	610	730	179	88	1.04	1.18							41	20	132	46		
31	796	901	236	118	0.99	0.96									103	39		
32	73	111																
33	84	132																
34	102	148											300	38				
35	120	167											116	32				
36	117	153			0.90	0.73	17	12.2	2.2	4.7			594	272			50	30
37	199	332					6.9	6.2			12300	4300	218	109				
38	206	315					9	11.0			4300	3200	213	104				
39	211	232					16	13.8	4.1	3.3	1090	2550	220	61				
40	210	242					17	18.0	1.7	1.3	230	3180	183	137				
41	500	600					2.5	6.1	6.6	4.6	17500	16900	219	166	394	219		
42	350	500					15	11.9	5.4	4.5	400	6900	184	61	314	175		
43	<u>813</u>	<u>1614</u>											310	155	465	407		
44	174	754					18.1	11.9	2.2	6.4	900	9900	279	217				
45	906	878																
46	68	88																

1/2

Taulukko L1.2. Aineiston tilastollisia tunnuslukuja.

	$T_{upper,max}$ (°C)		$T_{lower,max}$ (°C)		$z_{layer,min}$ (m)		$O_{2,min}$ (%)		$CO_{2,max}$ (%)		CO_{max} (ppm)		$t_{upper,100C}$ (s)		$t_{upper,300C}$ (s)		$t_{layer,1.5m}$ (s)	
	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C
N	42	42	16	16	21	21	15	15	10	10	10	10	27	27	12	12	11	11
min	40	35	21	15	0.10	0.00	0.01	2.9	1.7	0.90	1	1	32	7	103	39	50	25
max	906	970	710	700	1.20	2.10	20.9	20.4	17.0	6.4	22000	16900	467	375	465	407	285	321
avg	308	325	227	174	0.75	1.08	12.6	11.6	5.4	4.0	6472	4993	199	131	287	213	168	170
std	249	254	248	227	0.31	0.57	6.4	4.8	4.9	1.8	8023	5080	108	106	121	112	88	119

N = pisteiden lukumäärä, min = pienin arvo, max = suurin arvo, avg = keskiarvo ja std = keskihajonta.

Taulukko L1.3. CFAST-ohjelman antaman arvon ja mitatun tuloksen erotukset $\Delta = X_{\text{CFAST}} - X_{\text{mitattu}}$ ja erotuksen suhteelliset arvot $\text{rel } \Delta = (X_{\text{CFAST}} - X_{\text{mitattu}}) / X_{\text{CFAST}}$. Alleviivattujen kursivoitujen arvojen suhteellinen ero poikkeaa selvästi muista suhteellisista eroista.

	$T_{\text{upper,max}}$		$T_{\text{lower,max}}$		$z_{\text{layer,min}}$		$O_{2,\text{min}}$		$CO_{2,\text{max}}$		CO_{max}		$t_{\text{upper,100C}}$		$t_{\text{upper,300C}}$		$t_{\text{layer,1.5m}}$	
	Δ (°C)	rel Δ (%)	Δ (°C)	rel Δ (%)	Δ (m)	rel Δ (%)	Δ (%)	rel Δ (%)	Δ (%)	rel Δ (%)	Δ (ppm)	rel Δ (%)	Δ (s)	rel Δ (%)	Δ (s)	rel Δ (%)	Δ (s)	rel Δ (%)
1	115	11.9	-70	-13.7	-0.10	-14.3	6.1	99.8	-11	-183	<u>-20000</u>	<u>-1000</u>	20	6.5	-113	-46.1	71	22.1
2	45	5.7	100	19.6	-0.15	-21.4	3.3	32.4	-6.4	-152	<u>-5000</u>	<u>-500</u>	10	2.9	19	5.0	36	11.2
3	-40	-5.6	-10	-1.4	0.50	71.4							20	16.7				
4			-250	-55.6	0.50	83.3							-30	-42.9				
5	20	8.0	-30	-75.0	0.50	33.3							10	9.1				
6	15	16.7	0	0.0	0.10	7.7												
7	0	0.0	6	20.0	-0.20	-28.6												
8	230	48.9	-30	-66.7	1.0	58.8	-5.4	-43.2	2	46.5			-13	-7.0	-191	-90.1	31	13.7
9	40	36.4	-2	-10.5	0.60	37.5	-1.6	-9.8					-247	-112			33	12.1
10	-20	-57.1	-6	-40.0	0.70	41.2											26	9.1
11	-5	-14.3			1.0	58.8												
12	70	20.6	-3	-8.1	1.5	83.3	<u>-12.6</u>	<u>-434</u>	-1.1	-122	0	0.0	-15	-4.0				
13	-45	-69.2	-15	-21.4	1.3	61.9	-0.5	-2.5					-60	-40.0	-91	-41.7		
14	2	0.9																
15	-76	-28.7																
16	-212	-81.5																
17	-45	-23.8																
18	-88	-31.9																
19	-175	-46.3																
20	15	6.8											-65	-464				
21	105	58.7															-30	-50.8
22	-14	-4.5											-25	-357	0	0.0		
23	144	56.9											<u>-172</u>	<u>-2400</u>			-12.5	-25.0
24																		
25	-127	-22.4	<u>-297</u>	<u>-418</u>	0.27	30.7							-15	-46.9	21	9.1	133	

Taulukko L1.3. Jatkoa.

26	-70	-16.3			0.16	22.5	6.5	43.3					-43	-22.5	-6	-2.2	-43	-172
27	-169	-112			<u>-0.41</u>	<u>-513</u>							42	15.1			-19	-15.1
28	-51	-89.5			-0.45	∞											-55	-37.2
29	87	19.0	-36	-75.0	0.19	14.5							-71	-229				
30	120	16.4	-91	-103	0.14	11.9							-21	-105	-86	-187		
31	105	11.7	-118	-100	-0.03	-3.1									-64	-164		
32	38	34.2																
33	48	36.4																
34	46	31.1											-262	-689				
35	47	28.1											-84	-263				
36	36	23.5			-0.17	-23.3	-4.8	-39.3	2.5	53.2							-20	-66.7
37	133	40.1					-0.7	-11.3			-8000	-186	-109	-100				
38	109	34.6					2	18.2			-1100	-34.4	-109	-105				
39	21	9.1					-2.2	-15.9	-0.8	-24.2	1460	57.3	-159	-261				
40	32	13.2					1	5.6	-0.4	-30.8	2950	92.8	-46	-33.6				
41	100	16.7					3.6	59.0	-2	-43.5	-600	-3.6	-53	-31.9	-175	-79.9		
42	150	30.0					-3.1	-26.1	-0.9	-20.0	6500	94.2	-123	-202	-139	-79.4		
43													-155	-100	-58	-14.3		
44							-6.2	-52.1	4.2	65.6	9000	90.9	-62	-28.6				
45	-28	-3.2																
46	20	22.7																

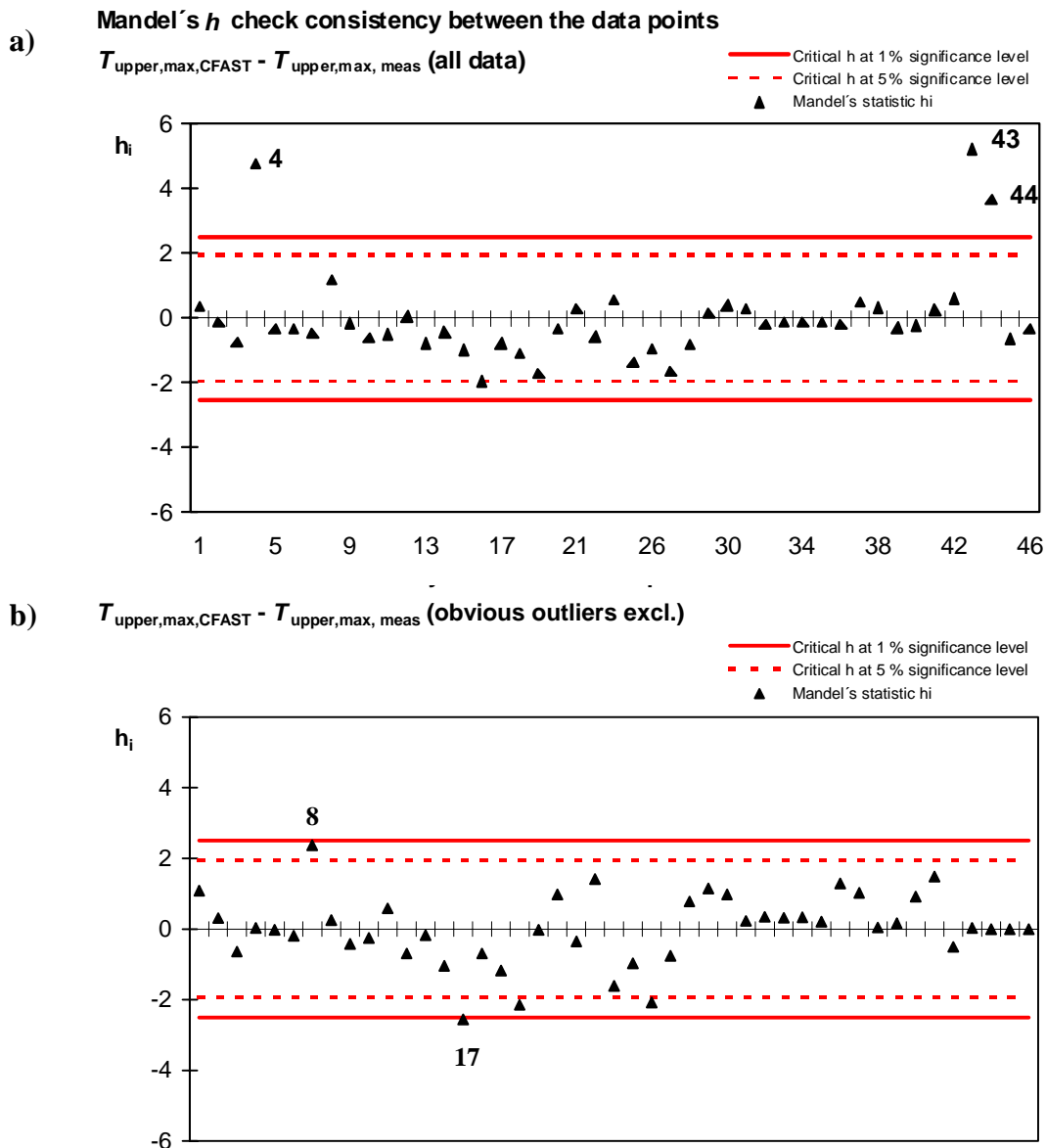
Taulukko L1.4. Tilastolliset tunnusluvut CFAST-ohjelman antaman arvon ja mitatun tuloksen erotuksille Δ ja suhteellisille erotuksille $rel\Delta$. Suluissa olevat arvot on laskettu siten, että poikkeavan suuria suhteellisia eroja vastaavat luvut on jätetty pois.

n:o	$T_{upper,max}$		$T_{lower,max}$		$z_{layer,min}$		$O_{2,min}$		$CO_{2,max}$		CO_{max}		$t_{upper,100C}$		$t_{upper,300C}$		$t_{layer,1.5m}$	
	Δ (°C)	r el Δ (%)	Δ (°C)	r el Δ (%)	Δ (m)	r el Δ (%)	Δ (%)	r el Δ (%)	Δ (%)	r el Δ (%)	Δ (ppm)	r el Δ (%)	Δ (s)	r el Δ (%)	Δ (s)	r el Δ (%)	Δ (s)	r el Δ (%)
N	42	42	16 (15)	16 (15)	21 (20)	20 (19)	15 (14)	15 (14)	10	10	10 (8)	10 (8)	27 (25)	27 (25)	12	12	11	11
min	-212	-112	-297 (-250)	-418 (-103)	-0.45 (-0.45)	-513 (-28.6)	-12.6 (-6.2)	-434 (-52.1)	-11.0	-183	-20000 (-8000)	-1000 (-186)	-262 (-247)	-2400 (-464)	-191	-187	-55	-172
max	230	58.7	100 (100)	20.0 (20.0)	1.5 (1.5)	83.3 (83.3)	6.5 (6.5)	99.8 (99.8)	4.2	65.6	9000 (9000)	94.2 (94.2)	42 (42)	16.7 (16.7)	21	9.1	71	22.1
avg	17	0.8	-53 (-37)	-59.3 (-35)	0.33 (0.37)	0.7 (27.7)	-1.0 (-0.1)	-25.1 (4.2)	-1.4	-41.1	-1479 (1276)	-139 (13.9)	-68 (-56)	-207 (-100)	-74	-57.6	2	-27.1
std	92	39.0	99 (77)	104 (41)	0.54 (0.53)	125.8 (36)	5.1 (4.1)	120.5 (43)	4.4	86.9	8184 (5163)	353.1 (95)	78 (67)	469 (127)	73	65.5	40	56.4

N = pisteiden lukumäärä, min = pienin arvo, max = suurin arvo, avg = keskiarvo ja std = keskihajonta.

LIITE 2 Poikkeavat havainnot, esimerkki

Ylemmän kerroksen lämpötilan havainnoista kolme (numerot 4, 43 ja 44) poikkeaa selvästi toisista, ks. kuva L2.1a). Kun nämä havainnot poistetaan, jää jäljelle kuvan L2.1b) esittämä havaintojoukko, jossa havainnot numero 8 ja 17 ovat hylkäämisrajan tuntumassa, mutta niitä ei kuitenkaan poistettu havaintojoukosta.

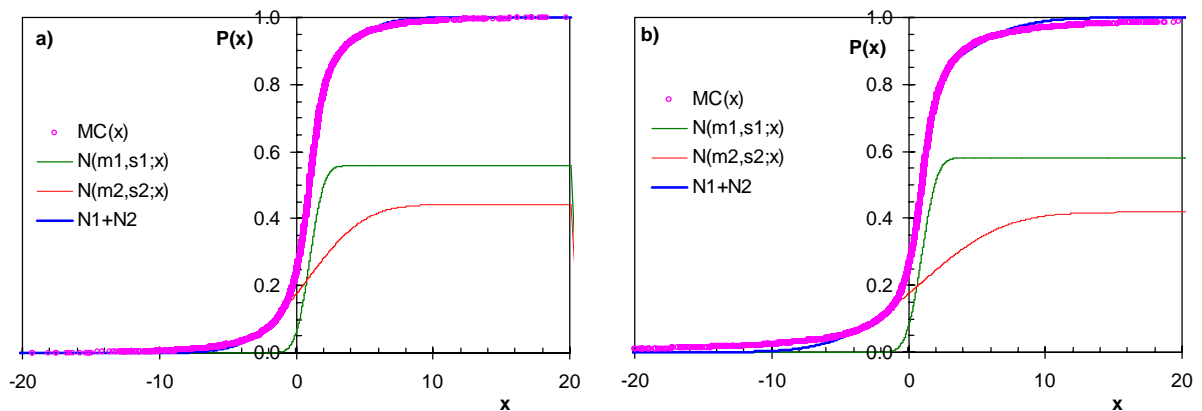


Kuva L2.1. Ylemmän kerroksen maksilämpötilan poikkeavien havaintojen tarkastelu: a) kaikki luvut ja b) selvästi muista poikkeavat luvut poistettu. Alemmassa kuvassa merkityjä havaintoja ei kuitenkaan poistettu havaintojoukosta.

LIITE 3 Suhteellisten erotusten tarkastelu

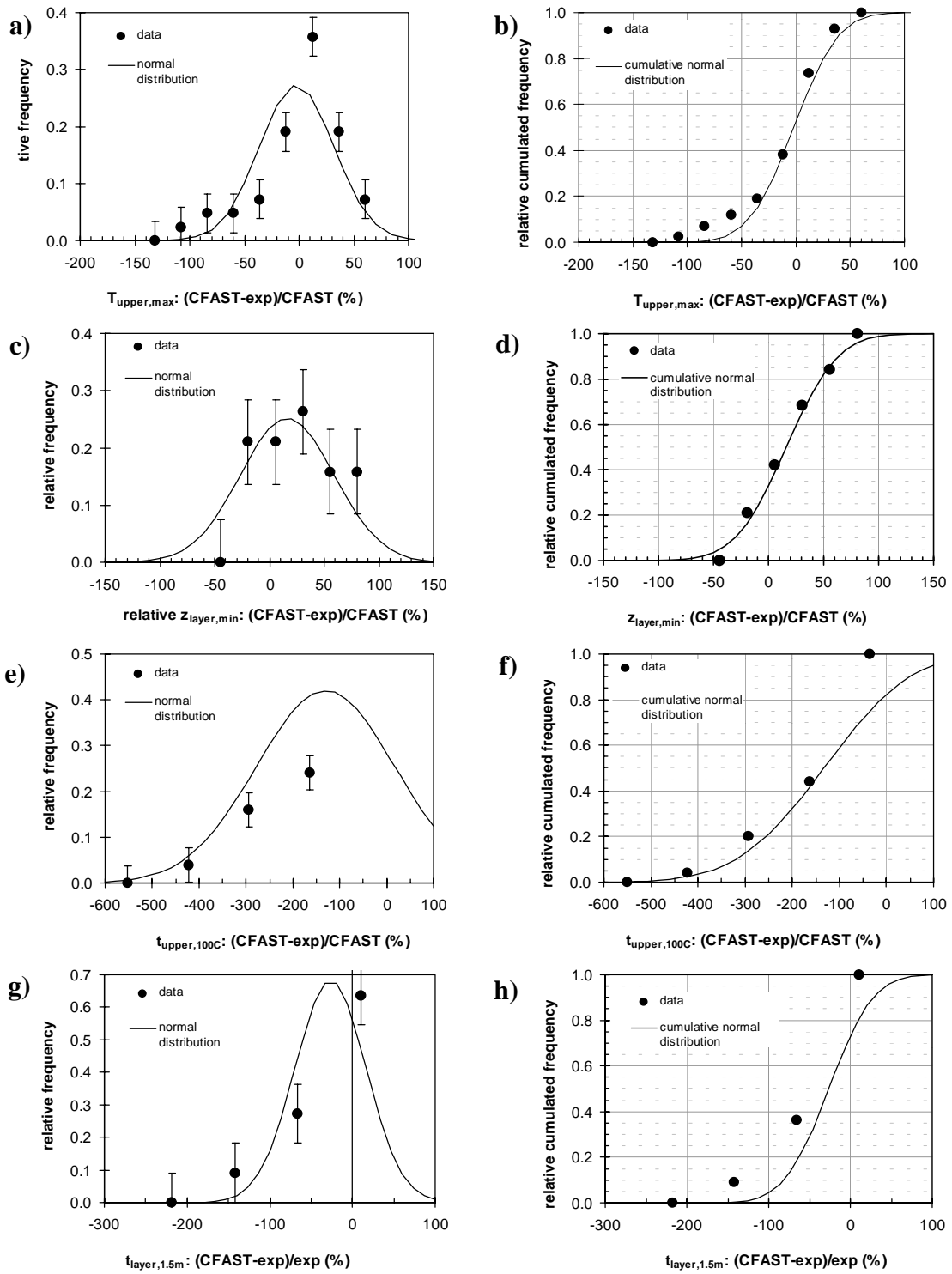
Vertailussa käytettyjen suureiden $T_{\text{upper,max}}$, $T_{\text{lower,max}}$, $z_{\text{layer,min}}$, $O_{2,\text{min}}$, $CO_{2,\text{max}}$, CO_{max} , $t_{\text{upper,100C}}$, $t_{\text{upper,300C}}$ ja $t_{\text{layer,1.5m}}$ suhteelliset erotukset on laskettu kaavalla $(X_{\text{CFAST}} - X_{\text{mitattu}})/X_{\text{CFAST}}$, missä X vastaa jotakin vertailusuuretta ja alaindeksi ”CFAST” viittaa CFAST-ohjelmalla laskettuun arvoon ja alaindeksi ”mitattu” viittaa kokeista saatuun arvoon. On huomattava, että kahden satunnaissuureen osamääränä tämä suure ei ole normaalijakautunut. Lisäksi ongelmana ovat nimittäjän pienet arvot, joilla ko. suhde saa hyvin suuria arvoja. Nämä pitää poistaa jonkun – mieluiten fysikaalisen – kriteerin mukaan, mutta mitään yleistä ohjetta tällaiselle kriteerille ei voida esittää.

Likimääräisesti satunnaislukujen suhteellisen erotuksen jakaumaa voidaan pyrkiä approksimoimaan esim. kahden normaalijakauman muotoisen funktion painotettuna summana. Kuvassa L3.1 on esimerkki tästä menettelystä suurelle $X = (X_1 - X_2)/X_2$, missä X_1 ja X_2 ovat $N(0,1)$ -normaalijakautuneita[†] satunnaislukuja. Eri kuvat vastaavat kahta erilaista katkaisukriteeriä suurelle X_1 : $|X_1| > 0.1$ ja $|X_1| > 0.01$. Suureen X keskiarvo μ_X on aina = 1, mutta keskihajonta σ_X riippuu katkaisukriteeristä: $\sigma_X = 2.3$ ($|X_1| > 0.1$) ja $\sigma_X = 4.1$ ($|X_1| > 0.01$).



Kuva L3.1. Kahdesta satunnaismuuttujasta X_1 ja X_2 muodostetun suureen $X = (X_1 - X_2)/X_2$ jakauma. Pisteet kuvaavat Monte-Carlo –menetelmällä laskettua jakaumaa ja käyrät tälle jakaumalle laskettua approksimaatiota (paksu käyrä), joka koostuu kahdesta normaalijakauman muotoisesta funktiosta (ohuet käyrät). Kuva a): arvot $|x_1| < 0.1$ on poistettu ja kuva b): arvot $|x_1| < 0.01$ on poistettu.

[†] Merkintä tarkoittaa, että ko. satunnaislukujen keskiarvo = 0 ja keskihajonta = 1.



Kuva L3.2. Suhteellisen erotuksen $(X_{CFAST} - X_{mitattu})/X_{CFAST}$ jakaumat suureille $T_{upper,max}$ (a,b), $z_{layer,min}$ (c,d), $t_{upper,100C}$ (e,f) ja $t_{layer,1.5m}$ (g,h). Vasemmalla on todennäköisyystiheys ja oikealla kertymäfunktio. Virhejanat osoittavat ykkösen suuruisen (yksi havainto) hajonnan. Käyrät ovat yhtäaikaaisesti todennäköisyystiheuteen ja kertymäfunktioon sovitettuja normaalijakaumia.

Edellä mainituista syistä suhteellinen erotus ei ole ongelmaton suure CFAST- ja mitaustulosten tilastolliseen vertailuun. Ongelmat liittyvät kuitenkin tulosten hajonnan ja sitä kautta niiden merkittävyyden arviointiin, eivät keskiarvoon. Toisaalta suhteellinen erotus on kuitenkin hyvin havainnollinen suure: tieto siitä, montako prosenttia CFAST-tulos mittaustuloksista poikkeaa, on hyvin käytännöllinen tieto.

Suhteellista poikkeamaa voidaan arvioida kuvasta L3.2, jossa esitetään suureille $T_{upper,max}$, $z_{layer,min}$, $t_{upper,100C}$ ja $t_{layer,1.5m}$ laskettujen suhteellisten erotusten histogrammi-analyysistä saadut jakaumat. Jakaumiin on sovitettu normaalijakaumaa kuvaavat funktiot. Sovitus tehtiin sekä todennäköisyystiheydelle että kumulatiiviselle jakaumalle samanaikaisesti.

Taulukko L3.1. Keskiarvot ja hajonnat CFAST-ohjelmalla laskettujen tulosten ja kokeellisten tulosten suhteelliselle erotukselle.

	pisteistä lasketut arvot		Normaalijakaumasovituksen antamat arvot	
	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	Hajonta
$T_{upper,max}$ (°C)	-3 %	32 %	-2 %	34 %
$z_{layer,min}$ (m)	17 %	35 %	16 %	42 %
$t_{upper,100C}$ (s)	-170 %	11 %	-130 %	147 %
$t_{layer,1.5m}$ (s)	-29 %	41 %	-27 %	43 %

Kuvissa esitetyistä pisteistä ja niihin sovitetuista normaalijakaumista voidaan lukea keskiarvot ja arviot hajonnan suuruudelle, ks. taulukko L3.1. Luvuista voidaan nähdä, että ylemmän kerroksen lämpötilojen suhteellinenkin erotus on pieni (vrt. kohta 5.2.3). CFAST-ohjelman ennustama aika, jossa ylemmän kerroksen lämpötila nousee 100 °C:seen, on selvästi kokeissa havaittua aikaa lyhyempi. Suhteellinen ero vyöhykkeiden rajapinnan korkeuslukemissa ei hajonnan puitteissa ole merkittävän suuri. Sama pätee ajalle, jossa rajapinta laskeutuu 1,5 m:n tasolle.

LIITE 4 CFAST-tulosten ja mittaustulosten erojen tilastollinen tarkastelu

Taulukko L4.1. CFAST-tulosten (C) ja mitattujen arvojen (E) erotuksen $\Delta = C - E$ kaksitahoiset varmuusvälit^{1,2,3)}.

	$T_{upper,max}$ (°C)	$T_{lower,max}$ (°C)	$z_{layer,min}$ (m)	$O_{2,min}$ (%)	$CO_{2,max}$ (%)	CO_{max} (ppm)	$t_{upper,100C}$ (s)	$t_{upper,300C}$ (s)	$t_{layer,1.5m}$ (s)
	C-E	C-E	C-E	C-E	C-E	C-E	C-E	C-E	C-E
N	42	16	21	15	10	10	27	12	11
keskiarvo $\bar{\Delta}$	17	-53	0.33	-1.0	-1.4	-1480	-68	-74	1.6
hajonta s_e	251	238	0.46	5.7	3.7	6720	107	116	105
alaraaja, $\alpha = 1\%$	-127	-284	-0.05	-6.7	-6.2	-10120	-146	-208	-126
yläraaja, $\alpha = 1\%$	162	178	0.71	4.8	3.4	7170	10	60	129
alaraaja, $\alpha = 5\%$	-92	-225	0.04	-5.2	-4.9	-7790	-127	-172	-92
yläraaja, $\alpha = 5\%$	126	118	0.62	3.3	2.1	4830	-9.6	25	95
alaraaja, $\alpha = 10\%$	-74	-196	0.09	-4.5	-4.3	-6690	-117	-155	-76
yläraaja, $\alpha = 10\%$	109	89	0.57	2.6	1.5	3730	-19	8	79

¹⁾ Keskiarvoja ja hajontoja laskettaessa on oletettu, että CFAST- ja koetulosten jakaumien keskihajonnat ovat yhtäsuuret, mikä yleensä ottaen päteekein havaintoaineistolle (useimmat poikkeamat eivät ole tilastollisesti merkittäviä riskitasolla 5 %).

²⁾ Varmuusväli tarkoittaa aluetta keskiarvon ympärillä, jolla suureen voidaan katsoa olevan tietyllä merkittävyydellä. Merkittävyydellä kuvaa sitä, miten harvinaista voidaan katsoa olevan, että suure ei kuulu tähän väliin. Esimerkiksi 99 % :n varmuusväli tarkoittaa sitä, että todennäköisyys, että suure ei kuulu tähän väliin, on pienempi tai yhtäsuuri kuin 1 %. Tässä varmuusvälit on laskettu kaavalla [Laininen 1982, s. 181]

$$\bar{x}_{CFAST} - \bar{x}_{mitattu} \pm t_{1-\alpha/2}(N_1 + N_2 - 2) \cdot s_e \cdot \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}$$

missä \bar{x}_{CFAST} ja $\bar{x}_{mitattu}$ ovat CFAST- ja koetulokset, N_1 on CFAST-lukemien lukumäärä ja N_2 on koetulosten lukumäärä, $t_{1-\alpha/2}(N-1)$ on Studentin t-jakauman kertymäfunktio ja hajonta s_e on laskettu kaavalla

$$s_e = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

ja s_1 ja s_2 ovat CFAST- ja koetulosten hajonnat.

³⁾ Erisuuruuksien poikkeamien merkittävyyttä voidaan sanallisesti kuvata seuraavasti [Lokki 1980, s. 55–56]: poikkeama, jonka todennäköisyys on alle 1 %, on harvinainen, ja poikkeama, jonka todennäköisyys on 1 %:n ja 5 %:n välillä, on melko harvinainen. Tämä jaottelu riippuu luonnollisesti ilmiöstä: joiltakin suureilta voidaan odottaa suurempaa tarkkuutta kuin joiltain toisilta erikaltaisiin ilmiöihin liittyviltä suureilta. Esimerkiksi joillekin kemiallisille menetelmille Lokki mainitsee melko harvinaisen tapahtuman ylärajana voitavan pitää todennäköisyyttä 10 %. Tämän rajan voidaan katsoa soveltuvan myös palotekniikassa havaittavien ilmiöiden luokitteluun.

Taulukko L4.2. Tilastollinen analyysi siitä, poikkeako CFAST-tulosten (C) ja mitattujen arvojen (E) erotus $\Delta = C - E$ nollassa eli ovatko CFAST-tulokset samoja kuin koetulokset. Hypoteesi H_0 on siis $\Delta = 0$, ja hypoteesi H_1 on $\Delta \neq 0$. Hypoteesin H_0 hylkämisehto riskitasolla α on $|z_t| \geq t_{1-\alpha/2}(N_1 + N_2 - 2)$. Viimeisellä rivillä on laskettu-na testisuureen merkittävyys hypoteesin H_0 kannalta.

	$T_{upper,max}$	$T_{lower,max}$	$z_{layer,min}$	$O_{2,min}$	$CO_{2,max}$	CO_{max}	$t_{upper,100C}$	$t_{upper,300C}$	$t_{layer,1.5m}$
	Δ (°C)	Δ (°C)	Δ (m)	Δ (%)	Δ (%)	Δ (ppm)	Δ (s)	Δ (s)	Δ (s)
testisuure z_t	0.87	-2.22	0.48	-0.42	-0.57	-11.6	-5.66	-6.99	0.14
$\alpha = 1\%$	2.64 (H_0 ok)	2.75 (H_0 ok)	2.70 (H_0 ok)	2.76 (H_0 ok)	2.88 (H_0 ok)	2.88 (H_0 voidaan hylätä)	2.67 (H_0 voidaan hylätä)	2.82 (H_0 voidaan hylätä)	2.85 (H_0 ok)
$\alpha = 5\%$	1.99 (H_0 ok)	2.04 (H_0 voidaan hylätä)	2.02 (H_0 ok)	2.05 (H_0 ok)	2.10 (H_0 ok)	2.10 (H_0 voidaan hylätä)	2.01 (H_0 voidaan hylätä)	2.07 (H_0 voidaan hylätä)	2.09 (H_0 ok)
$\alpha = 10\%$	1.66 (H_0 ok)	1.70 (H_0 voidaan hylätä)	1.68 (H_0 ok)	1.70 (H_0 ok)	1.73 (H_0 ok)	1.73 (H_0 voidaan hylätä)	1.67 (H_0 voidaan hylätä)	1.72 (H_0 voidaan hylätä)	1.72 (H_0 ok)
merkittävyys ¹⁾	39%	3%	63%	68%	58%	0%	0%	0%	89%

¹⁾ Tämä merkittävyys tarkoittaa sitä, kuinka merkittävästi testisuure tukee hypoteesia H_0 : arvo 0 % tarkoittaa, että testisuureen perusteella H_0 voidaan hylätä ilman riskiä (riski = 0 %).

Kirjallisuusviitteet

Laininen, P. 1982. Todennäköisyyslasku ja tilastomatematiikka. 3. painos. Espoo: Ota-paino, 1982. 254 s. 462. ISBN 951-671-260-6

Lokki, O. 1980. Tutkimustulosten tilastollinen hallinta ja käyttö. 1. painos. Helsinki: Insinööritieto Oy, 1980. 591 s. ISBN 951-793-195-6

LIITE 5 KAHDEN PALOPATSASMAALLIN VERTAILUA

Perusongelma korkeiden tilojen tulipalon simuloinnissa on, että tällä hetkellä ei tiedetä, mikä – jos mikään – monista olemassaolevista palopatsasmalleista laskee korkeiden tilojen lisäilmavirtauksen oikein. Yleisimmin lisäilman laskentaan käytetään kahta periaatteeltaan erilaista mallia: yksi on CFAST-ohjelmassakin käytetty McCaffreyn palopatsasmalli, joka perustuu koetuloksiin ja niiden dimensioanalyysiin pohjautuvaan mallintamiseen. Toinen on Zukoskin pistemäisen palolähteen oletukseen perustuva palopatsasmalli, jonka parametrit on haettu mittaustulosten avulla. Nämä mallit laskevat palopatsaan virtauksen eri korkeuksilla lähtien pelkästään annetusta palotehosta. On olemassa myös muita vaihtoehtoisia lähestymistapoja, kuten Heskestadin malli, mutta yleensä niissä tarvitaan muitakin tietoja kuin pelkkä paloteho; siksi niitä käytetään vähemmän.

McCaffreyn malli massavirtauksella \dot{m}_e (kg/s) palopatsaassa korkeudella z (m) on

$$\dot{m}_e = 0.011 \cdot \dot{Q}_c \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{0.566} \quad 0 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \leq 0.08 \quad (\text{L5.1})$$

$$\dot{m}_e = 0.026 \cdot \dot{Q}_c \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{0.909} \quad 0.08 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \leq 0.20 \quad (\text{L5.2})$$

$$\dot{m}_e = 0.124 \cdot \dot{Q}_c \left(\frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{1.895} \quad 0.20 \leq \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}}, \quad (\text{L5.3})$$

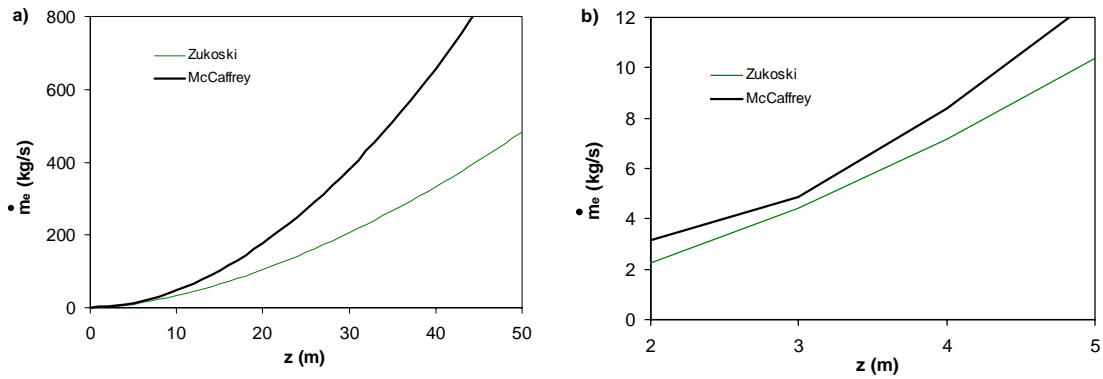
missä \dot{Q}_c on palotehon konvektiivisesti kuljettava osuus (kW).

Zukoskin malli on

$$\dot{m}_e = 0.071 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3}, \quad (\text{L5.4})$$

missä \dot{Q} on kokonaispaloteho (kW). On huomattava, että hyvin suurilla korkeuksilla Zukoskin mallin perustana olevan pistelähdemallin tulisi lähestyä oikeaa ratkaisua.

McCaffreyn ja Zukoskin malleja on verrattu kuvassa L5.1. Nähdään, että suurilla korkeuksilla mallien ennusteet poikkeavat toisistaan suuresti mutta pienemmillä korkeuksilla tulokset ovat lähes yhtenevät.

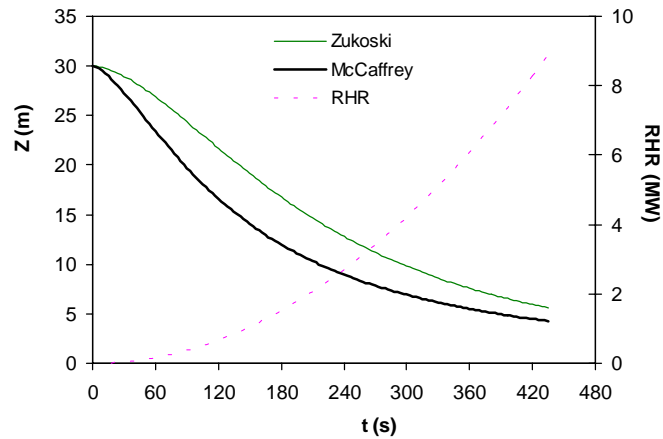


Kuva L5.1. McCaffreyn ja Zukoskin palopatsasmalleilla lasketut massavirrat palopatsaassa korkeuden z funktiona: a) laaja korkeusalue ja b) tyypillisiä huoneenkorkeuksia vastaava korkeusalue. Kokonaispalotehon on oletettu olevan 1 MW.

Sitä, miten massavirtausten poikkeavuudet heijastuvat tulipalotilanteen kannalta oleellisiin suureisiin, voidaan arvioida käyttämällä yksinkertaistettuja vyöhykemalli-kaavoja. Esimerkiksi vyöhykkeiden rajapinnan korkeutta Z voidaan arvioida lähtien seuraavasta yhtälöstä:

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{\dot{m}_e}{A\rho_\infty}, \quad (\text{L5.5})$$

missä A on tilan pohjapinta-ala ja $\rho_\infty \approx 1.2 \text{ kgm}^{-3}$ on ulkoilman tiheys.



Kuva L5.2. Vyöhykkeiden rajapinnan korkeus nopeasti kehittyvässä palossa (kasvua kuvaava kerroin 0.047 kW s^{-2}). Myös paloteho (RHR) on esitetty (oikeanpuoleinen pystyasteikko).

Sijoittamalla McCaffreyn tai Zukoskin mallin massavirtaus ja integroimalla saadaan kuvassa L5.2 esitetty ennuste korkeudelle Z . Tulipalon on oletettu kehittyvän nopean at^2 -mallin mukaisesti; tilan korkeudeksi on oletettu 30 m ja lattiapinta-alaksi 1000 m^2 .

Käyristä nähdään, että McCaffeyn mallin mukaan rajapinta laskeutuu nopeammin kuin Zukoskin mallin mukaan (esim. 15 m saavutetaan McCaffrey'n mallin mukaan n. 140 s:ssä, kun siihen Zukoskin mallin mukaan kuluu noin 200 sekuntia). Jos mallien antamien ennusteiden erotuksen katsotaan edustavan malleihin liittyvää epävarmuutta ja verrataan tätä arvoa McCaffrey'n mallin tulokseen, malleihin liittyvä suhteellinen epävarmuus on samaa suuruusluokkaa kuin kuvassa 7 esitettyjen kokeellisten ja CFAST-tulosten vertailuun liittyvä epävarmuus.



Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti			
Nimeke Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi			
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa tarkasteltiin vyöhykemalliohjelman CFAST tulosten pätevyyttä ja ohjelmiston dokumentointia tarkoituksena arvioida ohjelman soveltuvuutta insinööriäkaluksi. Arviointi perustuu ohjelmiston dokumentteihin, ohjelmiston arviointia käsitteleviin artikkeleihin, jotka ovat ilmestyneet referoiduissa tieteellisissä julkaisuissa, sekä VTT:n omiin aiempiin arviointeihin.</p> <p>CFAST-ohjelmisto on kehitetty NIST:ssä (National Institute of Standards and Technology, USA), josta se on vapaasti saatavissa. Malli on laajassa käytössä ja siitä on runsaasti julkaisuja. Sen dokumentit ovat kattavia ja sisältävät myös mallin kelpoisuuden arviointia.</p> <p>Mallin pätevyysaluetta rajoittavat yleiset vyöhykemalleihin liittyvät tekijät. Kokeellisen palopatsas-mallin pätevyysalue voi rajoittaa laskennan pätevyyttä kohteena olevan tilan korkeuden kasvaessa. Horisontaalisessa suunnassa suurten tilojen mallintamista vaikeuttaa vyöhykemallin oletus suureiden vakioisuudesta vaakasuorassa suunnassa. Myös voimakkaasti turbulentit tilanteet voivat olla soveltumattomia vyöhykemalleilla simuloitaviksi.</p> <p>Tutkimuksen lähteinä käytetyissä julkaisuissa CFAST-mallia pidetään yleisesti ottaen käyttökelpoisena työvälineenä. Lähinnä suurten tilojen palojen laskennassa ohjelmiston kelpoisuuden osoittamiseen katsottiin tarvittavan vielä lisää kokeellista vertailumateriaalia.</p> <p>Kvantitatiivinen vertailu CFAST-ohjelman tulosten ja kokeellisten tulosten välillä osoitti, että CFAST-ohjelman tulokset ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötilasta ja ajasta, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu tasolle 1,5 m, vastaavat varsin hyvin koetuloksia. CFAST-ohjelmalla lasketut ajat, joissa ylemmän vyöhykkeen lämpötila nousee 100 °C:seen tai 300 °C:seen, olivat lähes poikkeuksetta lyhyempiä kuin mitatut ajat (turvallinen ennuste). Savupatjan paksuuden CFAST-ohjelma laski pienemmäksi kuin mitatut arvot (turvaton ennuste). Kaasupitoisuuksissa CFAST-tulosten jakautuminen mittaustulosten suhteen oli varsin satunnaista.</p>			
Avainsanat computer programs, fire safety, CFAST, zone models, assessment, evaluation, documentation, validity, mathematical models			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5664-5 (nid.) 951-38-5665-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R6SU00450	
Julkaisuaika Toukokuu 2000	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 51 s. + liitt. 14 s.	Hinta B
Projektin nimi TOPA (Toiminnallisten palosäädösten tekniset perusteet)		Toimeksiantaja(t) Palotutkimusraati ry, Palosuojelurahasto, ympäristöministeriö, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto ry, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Suomen Puututkimus Oy, Teräsrakenneyhdistys ry, Suomen Muoviteollisuusliitto ry	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2027
VTT-TIED-2027

Author(s) Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti			
Title Assessment of validity of the zone model program CFAST			
Abstract <p>In this study we have examined the validity of the results of the CFAST zone model program and evaluated its documentation in order to assess the suitability of the program to a fire-safety engineering tool. The material used in the study comprises the program documentation, articles published in international refereed journals addressing the assessment of the validity of the program and previous assessments by VTT.</p> <p>CFAST program has been developed at NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) where it can be obtained free of charge. The program is used world wide and literature on it is ample. Its documentation is comprehensive and include also assessment of its validity.</p> <p>The validity of the program is limited by factors associated with the applicability of zone models in general. The limits of validity of the empirical fire plume models constituting an essential part of zone models may restrict the applicability of the program in very high atria. Simulation of fires in spaces with large horizontal extent may be hampered by the assumption of homogeneity of quantities in the horizontal direction, inherent in zone models. Also simulation of vigorously turbulent conditions may be beyond the capability of zone models. In the articles used in this study, CFAST program is considered in general as an adequate tool for fire safety calculations. It is mainly in the case of simulation of fires in large spaces that the demonstration of the validity of the program is considered insufficient, requiring more experimental material to compare the program results with.</p> <p>From the quantitative comparison of the CFAST results with experimental data, the following findings emerged: CFAST results agreed well with the measured values for the upper zone maximum temperature and the time it takes for the upper and lower layer interface to descend to the level of 1,5 m. In most cases examined, the times for the upper zone temperature to reach 100 °C and 300 °C predicted by the CFAST program were shorter than the times observed in the experiments (a prediction on the safe side). Frequently, the calculated thickness of the upper zone was smaller than the experimental one (a prediction on the unsafe side). Comparison of the experimentally observed gas species concentrations with those calculated by CFAST reveals large and rather random scatter.</p>			
Keywords computer programs, fire safety, CFAST, zone models, assessment, evaluation, documentation, validity, mathematical models			
Activity unit VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5664-5 (soft back ed.) 951-38-5665-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R6SU00450	
Date May 2000	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 51 p. + app. 14 p.	Price B
Name of project TOPA (Toiminnallisten palosäädösten tekniset perusteet)		Commissioned by Palotutkimusraati ry, Palosuojelurahasto, Ministry of the Environment, Federation of Finnish Insurance Companies, The Finnish Association of Construction Product Industries, Finnish Wood Research Ltd., The Finnish Constructional Steelwork Association (FCSA), The Finnish Plastic Industries Federation	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

