

# Liekin leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä

## Tiivistelmä

Kaapelit muodostavat merkittäviä palokuormia erilaisissa koh-teissa, kuten ydinvoimaloissa, ja kaapelin tyypistä riippuen ne voivat levittää paloa hyvinkin voimakkaasti. Tässä tutkimukses-sa perehdyttiin viimeaikaisiin tutkimustuloksiin kirjallisuuskatsa-uksen avulla sekä tutkittiin liekin leviämisen mallintamista virta-uslaskennan keinoin. Termoplastisten PVC-pohjaisten kaapelien kokeellisesti määritetyissä liekin leviämisenopeuksissa oli jopa lä-hes kymmenkertaisia eroja toisiaan muistuttavien koeasetelmien välillä. Simuloinneissa liekin leviämistä tarkasteltiin yksittäisten hyllyjen syttymisaikojen sekä liekin leviämisenopeuksien kautta, ja simuloituja tuloksia verrattiin polttokokeista saatuihin arvoihin. Sekä tässä että muissa uusissa tutkimuksissa on saatu lupaavia tu-loksia pyrolyysimalleihin perustuvilla laskentamenetelmillä, jot-ka vaativat lähtöarvoikseen vain pienmittakaavakokeiden tulok-sia. Menetelmien kehittyessä laskennallista virtausmekaniikkaa voitaisiin mahdollisesti käyttää palon kehittymisen mallintamisen ympäristötekijät ja tapauskohtaiset yksityiskohdat huomioiden.

## JOHDANTO

Kaapelit muodostavat merkittäviä palokuormia erilaisissa kohteis-sa, kuten ydinvoimaloissa, ja kaapelin tyypistä riippuen ne voivat levittää paloa hyvinkin voimakkaasti. Tutkimustulokset kaapelien palokäyttäytymisestä täysmittakaavan polttokokeissa ovat merk-itävästi lisääntyneet 2010- ja 2020-luvuilla. Kokeissa on havaittu, että liekin leviämisenopeuteen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä vaikuttavat esimerkiksi kaapelityyppi, kaapelien asettelutapa hyl-lyissä sekä ympäristöolosuhteet.

Termoplastisten polyvinyylikloridikaapelien (PVC-kaapeli) ko-keellisesti määritetyissä liekin leviämisenopeuksissa on havaitta-vissa jopa kymmenkertaisia eroja toisiaan muistuttavien koease-telmien välillä. McGrattanin ym. [1] toteuttamassa CHRISTIFI-RE-projektissa tehtyjen kokeiden perusteella liekin keskimääräi-

seksi leviämisenopeudeksi termoplastisissa kaapeleissa määritet-tiin noin 0,74 millimetriä sekunnissa, kun taas Zavaletan ym. [2] PRISME 2 -projektin polttokokeiden analyysin perusteella liekin leviämisenopeus PVC-kaapeleissa oli alimmillaankin 2,7 ja enim-millään jopa 7,1 millimetriä sekunnissa. Analysoidut CHRISTI-FIRE-projektin koeasetelmat koostuivat kolmesta neljään vaaka-suuntaisesta tikashyllystä, kun taas PRISME 2 -projektin koease-telmissa hyllyjä oli viisi. Lisäksi PRISME 2 -projektin koeasetel-massa hyllyt oli asetettu väliaikaista seinärakennelmaa vasten, kun taas CHRISTIFIRE-projektin koeasetelmissa hyllyjen lähettyvillä ei ollut rakenteita. [1, 2]

Myös kaapelien asettelulla on vaikutuksensa palon kehittymi-seen kaapelihyllyissä. Edellä mainituissa CHRISTIFIRE- ja PRIS-ME 2 -projektien polttokokeissa kaapelit oli aseteltu hyllyihin väl-jästi, jolloin kuumat palokaasut pääsivät vapaasti nousemaan kaa-peleiden lävitse. Asettelutavan vaikutusta ovat tutkineet esimer-kiksi Siemon ym. [3] ja Huang ym. [4]. Heidän tulostensa perus-teella on todettavissa, että mikäli kaapelit asetellaankin hyllyihin tiukasti, alimman hyllyn yläpuolella olevien hyllyjen syttyminen hidastuu. [3, 4]

Näiden lisäksi ympäristöolosuhteiden vaikutusta vaakasuuntais-ten kaapelihyllyjen palamiseen on tutkittu. PRISME 2 -projektis-sa suoritettiin samoille kaapelihyllyasetelmille polttokokeita sekä avoimessa hallissa että koneellisesti ilmastoiduissa suljetussa hu-oneistossa. Koetuloksista on havaittavissa, että PVC-kaapelien pa-lo saattaa aluksi kehittyä suljetussa huoneistoissa jopa nopeam-min kuin avoimessa hallissa, vaikka enimmäispalotehot jäävätkin suljetuissa huoneistossa pienemmäksi hapenpuutteen takia. [5]

Kirjallisuustutkimuksen havaintojen pohjalta voidaan koros-taa sitä, kuinka tärkeää on ymmärtää ympäristötekijöiden vaiku-tus palon käyttäytymiseen sekä ottaa ne huomioon palosta aiheu-tuvien riskien arvioimisessa. Koska polttokokeita voidaan tehdä vain rajatulle määrälle erilaisia koeasetelmia, erilaiset menetelmät

koetulosten hyödyntämiseksi testiolosuhteiden ulkopuolella ovat tärkeitä. Laskennallinen virtausmekaniikka (Computational Fluid Dynamics, CFD) on osoittautunut hyväksi menetelmäksi tarkastella sekä ympäristötekijöiden vaikutusta palon kehittymiseen että palon vaikutusta ympäristöönsä.

CHRISTIFIRE-projektissa ehdotettu niin kutsuttu FLASH-CAT -menetelmä [1] on otettu laajasti käyttöön vaaka-suuntaisten kaapelipalojen mallintamiseen. FLASH-CAT -menetelmässä oletetaan eri hyllyillä olevien kaapelien syttyvän ensin V-kuviossa ennalta määriteltynä ajanhetkinä, jonka jälkeen liekki etenevät hyllyissä tasaisella nopeudella. Menetelmän oletusparametrit on jaettu erikseen termoplastisista ja termoseteistä materiaaleista tehdyille kaapeleille. Zavaleta ym. [2] osoittivat että oletusparametrejä käyttämällä alkuperäinen menetelmä ei kykene ennustamaan palon kehitystä PRISME 2 -projektin polttokokeissa. He esittivät kuitenkin menetelmästä muunnellun version, joka pystyi mallintamaan palotehokäyrän kehittymisen yhdessä koetulosten perusteella määriteltujen parametrien kanssa [2]. FLASH-CAT -menetelmästä on esitetty myös useita muita muunneltuja versioita, esimerkiksi Bascou ym. [6] CFD-mallin ja Plumecocq ym. [7] kaksiväyhykemallin kanssa.

Kaapelihyllyjen palamista on mallinnettu myös käyttämällä pienmittakaavan koetuloksia. Beji ja Merci [8] käyttivät palon kehittymisen mallintamiseen kartiokalorimetrikokeen tuloksia niin, että CFD-mallissa materiaalin saavutettua sille tyypillisen syttymislämpötilan se paloi vastaavasti kuin näyte kartiokalorimetrikokeessa. Saadakseen simulointitulokset vastaamaan paremmin koetulosta, he kokeilivat myös materiaalin palokäyttäytymisen muuttamista mallissa [8]. Hehnen ym. [9] mallinsivat vaaka-suuntaisten kaapelihyllyjen palamista käyttäen kartiokalorimetrikokeen perusteella tehtyjä pyrolyysimalleja CFD-mallissa. Lisäksi he käyttivät kartiokalorimetrikoetulosta suoraan materiaalin palokäyttäytymisenä sekä FLASH-CAT -menetelmää [9].

Tässä tutkimuksessa liekin leviämistä vaaka-suuntaisessa kaapelihyllyssä tutkittiin laskennallisen virtausmekaniikan keinoin. Liekin leviämistä tarkasteltiin simuloinneissa yksittäisten hyllyjen syt-

tymisaikojen sekä liekin leviämisenopeuksien kautta, ja simuloituja tuloksia verrattiin polttokokeista saatuihin arvoihin. Tarkoituksena on tutkia, millä tarkkuudella liekin leviämistä voidaan mallintaa ilman että apuna käytetään täysmittakaavan polttokokeiden tuloksia. Suurin osa julkaistuista mallinnustavoista vaatii mallin kalibroimisen polttokoeatulosten avulla, mikä rajoittaa menetelmien käytettävyyttä tilanteissa, joissa polttokokeita ei ole tehty, ja joissa toisaalta simulaatiotuloksista olisi suurin hyöty.

## KAAPELIPALOSIMULOINNIT

### Tarkasteltu tapaus ja laskentamalli

Tutkimuksessa simuloitiin liekin leviämistä vaaka-suuntaisissa kaapelihyllyissä laskennallisen virtausmekaniikan ohjelman Fire Dynamics Simulator (FDS) avulla [10]. Virtauksia mallinnetaan ohjelmassa Navier-Stokes -yhtälöiden avulla. FDS hyödyntää suurten pyörteiden menetelmää (Large Eddy Simulation, LES) virtauksen turbulenssin mallintamiseen, ja se soveltuu käytettäväksi tapauksiin, joissa virtauksen Machin luku on alhainen. Ohjelman teoria on dokumentoitu kattavasti viitteessä [10].

Tutkimuksessa valittiin tarkasteltavaksi PRISME 2 -projektissa toteutettu polttokoe, jota projektissa kutsutaan nimellä CFSS-4. Kokeessa poltettiin viiden vaaka-suuntaisen kaapelihyllyn asetelma, jossa hyllyt olivat päällekkäin 30 senttimetrin etäisyydellä toisistaan. Hyllyt oli aseteltu väliaikaista seinärakennelmaa vasten, ja jokaisessa hyllyssä oli 44 PVC-kaapelia. Hyllyjen pituus oli 2,4 metriä ja leveys 0,45 metriä. Alin hylly sytytettiin keskeltä käyttäen propaanipoltinta, jonka teho oli 80 kW. [2, 5]

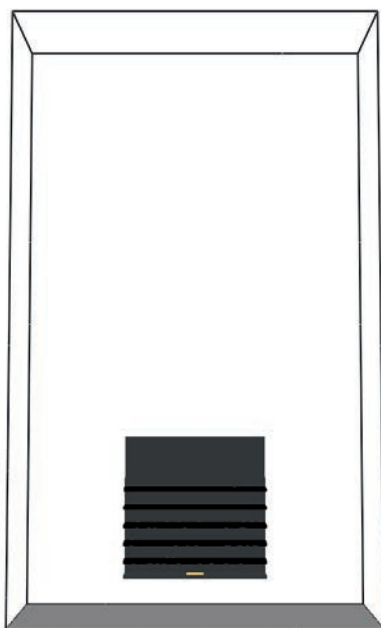
Kaapelihyllygeometria mallinnettiin FDS-ohjelmassa käyttäen 5 senttimetrin hilakokoa, mutta muualla kuin kaapelihyllyjen välittömässä läheisyydessä käytettiin 10 senttimetrin hilakokoa. Laskentahilan kopit olivat muodoltaan kuutioita. Laskenta-alueen leveys oli 2,4 metriä, pituus 6 metriä ja korkeus 10 metriä. Kaapelihyllyjen alle mallinnettiin betonilattia käyttäen materiaaliominaisuuksille tyypillisiä kirjallisuusarvoja. Simulaatioissa käytetty simulaatiogeometria ja laskenta-alue on esitetty kuvassa 1.

Kaapelihyllygeometrian luomiseen käytettiin VTT:llä kehitettyä stokastista menetelmää, jonka avulla voidaan mallintaa kaapelien satunnainen asettelu hyllyyn väljästi. Lopputuloksena saadaan arvio siitä, kuinka monta aukkoa tulee mallintaa muuten yhtenäiseen tasomaiseen geometriaan, jotta kaasujen virtaus kaapelien lävitse saadaan mallinnettua mahdollisimman tarkasti valitulla hilakoolla. CFSS-4 -kokeessa jokaiseen 0,45 metriä leveään hyllyyn oli aseteltu 44 PVC-kaapelia, joiden nimellinen halkaisija oli 14,5 millimetriä [5]. VTT:n menetelmää käyttämällä saadaan arvio, että 18,4 prosenttia hyllygeometrian pinta-alasta tulisi mallintaa aukkoina, mikä 5 senttimetrin hilakoolla vastaa 79 aukkoa. Aukkojen paikat geometriassa luodaan satunnaisesti jokaiselle hyllylle erikseen.

Käytetyllä hilakoolla kaapeleiden kokonaispinta-ala on merkittävästi pienempi kuin todellisuudessa, minkä takia paloon osallistuvaa pinta-alaa kasvatettiin parametrisesti. Esimerkiksi Kallada Janardhan ja Hostikka [11] ovat käyttäneet vastaavaa lähestymistapaa mallintaessaan puutapulin palamista.

### Kaapelin rakenne ja pyrolyysimallit

Koska CFSS-4 -polttokokeessa käytetystä PVC-kaapelista ei ole tarjolla kattavasti tietoa, tutkimuksessa hyödynnettiin Mangsin ja Hostikan [12] julkaisemia tuloksia MCMK 0.6/1kV -nimisestä PVC-kaapelista. Kaapelin nimellinen halkaisija on 13 millimetriä, ja sen painosta 36 prosenttia on metallia, 37 prosenttia vaippamateriaalia, 12 prosenttia eristemateriaalia ja 15 prosenttia täyteainetta. Tietojen perusteella kaapelit mallinnettiin tasomaiseksi



Kuva 1. Simulaatiogeometria ja käytetty laskenta-alue.

► yksinkertaistettuna siten että materiaalissa on kolme eri kerrosta kupariytimen päällä: päällimmäisenä vaippa, sitten täyteainetta ja viimeiseksi eristettä. Kerrosten paksuudet valittiin siten, että palokuorman määrä saatiin vastaamaan CFSS-4 -polttokoea. [12]

Pyrolyysimallin muodostamisessa hyödynnettiin Mangsin ja Hostikan [12] julkaisemia koetuloksia, jotka oli saatu termogravimetrisestä analyysistä (TGA) sekä käyttäen mikroskaalan polttokalorimetriä (MCC) ja kartiokalorimetriä. Pyrolyysimalleja tehtiin kaksi erilaista: yhdessä oletettiin saman materiaalin eri komponenttien reaktioiden olevan rinnakkaisia ja toisessa peräkkäisiä. Muuten mallit muodostettiin samalla tavalla. Ensin TGA- ja MCC-kokeiden tulosten perusteella määriteltiin jokaiselle palavalle materiaalille (vaippa, eriste, täyteaine) reaktiopolut.

Reaktiopolkujen määrittelyn ja reaktiokomponenttien nimeämisen jälkeen jokaiselle reaktiolle määriteltiin erikseen kineettiset parametrit. Käytännössä tämä tehtiin luomalla FDS-ohjelmaan malli TGA-kokeesta, ja eri kineettisillä parametreilla saatuja tuloksia verrattiin koetuloksiin. Kineettiset parametrit optimoitiin PyroPython-ohjelmalla [13]. Kuvassa 2 on esitetty massan muutos lämpötilan funktiona termogravimetrisessä analyysissä ja kokeessa sekä molemmilla eri malleilla saadut simulaatiotulokset.

Kineettisten parametrien optimoimisen jälkeen loput puuttuvat parametrit optimoitiin vertailemalla kartiokalorimetrikokeen sekä kokeen FDS-mallin tuloksia. Kartiokalorimetrikokeen tuloksia hyödyntämällä optimoitiin materiaalien lämmönjohtavuudet, ominaislämpökapasiteetit sekä reaktio- ja palamislämmöt. Kuvassa 3 on esitetty koekappaleen paloteho pinta-alayksikköä kohti sekä kartiokalorimetrikokeessa että eri pyrolyysimalleilla tehdyissä simulaatioissa.

## TULOKSET

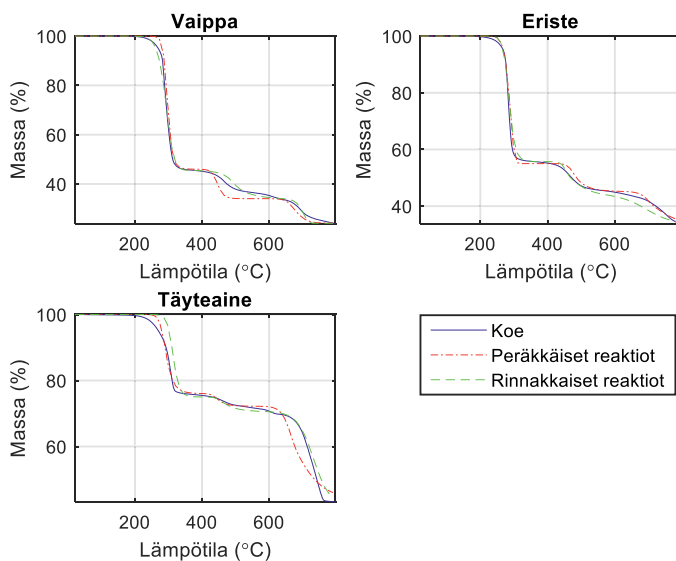
Palon kehittymistä kaapelihyllyissä simuloitiin noin 50 minuutin ajan, joka oli palon kesto polttokokeessa. Simulaatioissa palo kesti kuitenkin alle 15 minuuttia, eli pitkän hiipumisvaiheen sijaan palo hiipui hyvin nopeasti enimmäispalotehon saavuttamisen jälkeen.

Kuvassa 4 on esitetty simuloitu liekkien leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen. Kuva on simulaatiosta, jossa pyrolyysimallissa on käytetty rinnakkaisia reaktioita materiaalikomponenteille. Kuvasta on havaittavissa selkeä syttyneiden alueiden muodostama V-kuvio, mikä vastaa todellista käyttäytymistä.

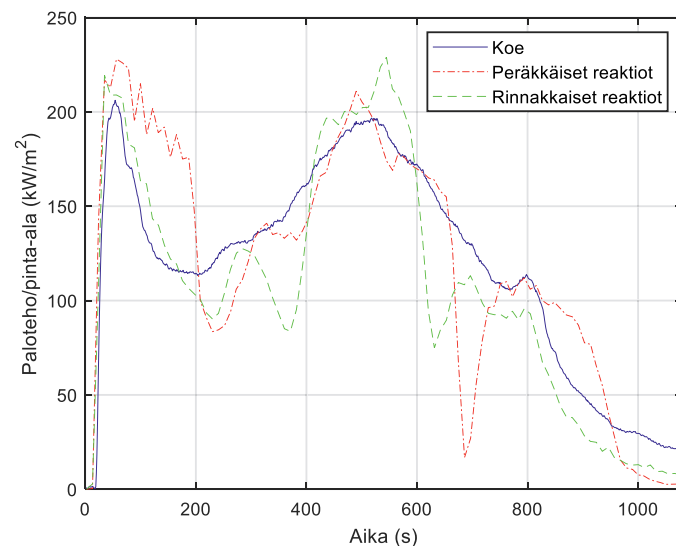
Enimmäispaloteho oli 3200 kW simulaatiossa, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli oletettu peräkkäisiksi, ja 3300 kW simulaatiossa, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritetty rinnakkaisiksi. Enimmäispalotehot saavutettiin 350:ssä ja 330 sekunnissa, vastaavasti. Polttokokeessa enimmäispaloteho oli 2600 kW, joka saavutettiin 390 sekuntia kokeen alkamisen jälkeen [2]. Simuloidut enimmäispalotehot olivat siis 23 ja 27 prosenttia suu-

remmat kuin koetulos. Koetulokseen verrattuna enimmäispaloteho saavutettiin simulaatioissa 40 ja 60 sekuntia liian aikaisin.

Simulaatioista määritellyt liekin leviämisenopeudet  $v_{l,i}$  sekä syttymisajat  $t_{s,i}$  eri hyllyille on esitetty taulukossa 1. Alinta hyllyä vastaa



Kuva 2. Massan muutos lämpötilan funktiona termogravimetrisessä analyysissä. Kuvassa on esitetty sekä koetulos että kahdella eri mallilla saadut simulaatiotulokset.



Kuva 3. Paloteho pinta-alayksikköä kohti sekä kartiokalorimetrikokeessa että kahdella eri pyrolyysimallilla tehdyissä simulaatioissa.

	$v_{l,1}$ (mm/s) / $t_{s,1}$ (s)	$v_{l,2}$ (mm/s) / $t_{s,2}$ (s)	$v_{l,3}$ (mm/s) / $t_{s,3}$ (s)	$v_{l,4}$ (mm/s) / $t_{s,4}$ (s)	$v_{l,5}$ (mm/s) / $t_{s,5}$ (s)
Polttokoe [2]	2,8 / 54	2,7 / 69	2,9 / 73	5,1 / 100	5,9 / 123
Pyrolyysimalli, peräkkäiset reaktiot	2,5 / 22	4,2 / 35	5,1 / 58	6,3 / 86	6,6 / 102
Pyrolyysimalli, rinnakkaiset reaktiot	2,7 / 16	4,3 / 29	5,1 / 48	6,0 / 70	6,6 / 93

Taulukko 1. Polttokokeelle määritetyt [2] sekä simuloidut liekin leviämisenopeudet  $v_{l,i}$  eri hyllyissä sekä hyllyjen syttymisajat  $t_{s,i}$ . Alinta hyllyä vastaa  $i = 1$ .

Kuva 4. Simuloitu liekkien leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen. Kuva on simulaatiosta, jossa on käytetty rinnakkaisia reaktioita pyrolyysimallissa.



$i = 1$ . Vertailua varten taulukossa on myös esitetty polttokokeelle vastaavat arvot, jotka Zavaleta ym. [2] ovat määritelleet polttokokeesta otettujen videoiden perusteella. Kun käytettiin pyrolyysimallia, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritelty peräkkäisiksi, syttymisajat olivat 14–59 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa ja liekin leviämisenopeudet taas olivat 11–77 prosenttia suuremmat. Kun taas käytettiin pyrolyysimallia, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritelty rinnakkaisiksi, syttymisajat olivat 25–70 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa ja liekin leviämisenopeudet taas olivat 4–77 prosenttia suuremmat.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa perehdyttiin viimeaikaisiin tutkimustuloksiin liekin leviämisestä vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä, sillä 2010- ja 2020-luvuilla aihepiiristä on tehty paljon uutta sekä kokeellista että laskennallista tutkimusta. Toisiaan muistuttavissa koeasetelmissä on havaittu jopa kymmenkertaisia eroja kokeellisesti määritellyissä liekin leviämisenopeuksissa, eli ympäristökäyttäjien sekä koeasetelman yksityiskohtien vaikutus palon leviämisenopeuteen kaapelihyllyissä on merkittävä. Tämä on otettava huomioon, kun koetuloksia halutaan hyödyntää tapauksiin, jotka ovat koeolosuhteiden ulkopuolella.

Vaakasuntaisten kaapelihyllyjen palamisen mallintamiseen on kehitetty useita menetelmiä, mutta suurin osa niistä vaatii lähtöarvoikseen tietoa palon käyttäytymisestä täysmittakaavassa, mikä heikentää niiden käytettävyyttä tapauksissa, jotka eroavat koeasetelmista. Sekä tässä että muissa uusissa tutkimuksissa on kuitenkin saatu lupaavia tuloksia pyrolyysimalleihin perustuvilla menetelmillä, jotka vaativat lähtöarvoikseen vain pienmittakaavakokeiden tuloksia. Menetelmien kehittyessä laskennallista virtausmekaniikkaa voitaisiin siis mahdollisesti käyttää palon kehittymisen mallintamisen ympäristökäyttäjät ja tapauskohtaiset yksityiskohdat huomioiden.

Tässä tutkimuksessa simuloitiin CFSS-4 -polttokoe PRISME 2 -projektista käyttäen laskennallista virtausmekaniikkaa. Väljästi aseteltujen kaapelihyllyjen simulaatiogeometria määriteltiin stokastisesti, jotta palokaasujen kulkeutuminen kaapelien läpi saataisiin kuvattua mahdollisimman tarkasti. Hyllyjen syttyminen tapahtuikin simulaatioissa laadullisesti arvioiden oikein. Simuloidut syttymisajat olivat 11–77 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa havaitut ajat, ja simuloidut liekin leviämisenopeudet taas olivat 4–77 prosenttia suuremmat kuin polttokokeessa. Simulaatiot suoritettiin käyttäen kahta eri pyrolyysimallia, joiden välillä oli ero siinä, määriteltiin eri materiaalien komponenttien reaktiot rinnakkaisiksi vai peräkkäisiksi. Keskimäärin mallien välinen ero

oli 12 %-yksikköä, kun simuloituja syttymisaikoja verrattiin koetulokseen, ja 3 %-yksikköä, kun simuloituja liekin leviämisenopeuksia verrattiin koetulokseen.

Tutkimuksessa käytetyt pyrolyysimallit muodostettiin käyttämällä pienmittakaavakokeiden tuloksia eri kaapelista kuin mitä täysmittakaavan polttokokeissa oli käytetty. Oikeaa kaapelia vastaavia tuloksia käyttämällä tuloksia voitaisiin mahdollisesti parantaa. Tulevaisuudessa menetelmää tulisi myös käyttää eri koeasetelmien ja kaapelityyppien mallintamiseen, jotta sen käytettävyyttä ja luotettavuutta voitaisiin arvioida kokonaisvaltaisemmin.

## LÄHDELUETTELO

[1] McGrattan, K., Lock, A., Marsh, N., Nyden, M., Bareham, S., Price, M., Morgan, A., Galaska, M. & Schenck, K. Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE), Phase 1: Horizontal Trays. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012. 176 s. + liitt. 5 s. (NUREG/CR-7010, Vol. 1).

[2] Zavaleta, P., Hanouz, R. & Beji, T. Improved Assessment of Fire Spread over Horizontal Cable Trays Supported by Video Fire Analysis. *Fire Technology*, 2019. Vol. 55, nro. 1, s. 233–255.

[3] Siemon, M., Riese, O., Forell, B., Krönung, D. & Klein-Heßling, W. Experimental and numerical analysis of the influence of cable tray arrangements on the resulting mass loss rate and fire spreading. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 497–513.

[4] Huang, X., Zhu, H., Peng, L., Zheng, Z., Zeng, W., Bi, K., Cheng, C. & Chow, W. Burning behavior of cable tray located on a wall with different cable arrangements. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 1, s. 64–73.

[5] Zavaleta, P., Suard, S. & Audouin, L. Cable tray fire tests with halogenated electric cables in a confined and mechanically ventilated facility. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 543–560.

[6] Bascou, S., Zavaleta, P. & Babik, F. Cable tray FIRE tests simulations in open atmosphere and in confined and mechanically ventilated compartments with the CALIF3S/ISIS CFD software. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 448–465.

[7] Plumecocq, W., Audouin, L. & Zavaleta, P. Horizontal cable tray fire in a well-confined and mechanically ventilated enclosure using a two-zone model. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 530–542.

[8] Beji, T. & Merci, B. Numerical simulations of a full-scale cable tray fire using small-scale test data. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 486–496.

[9] Hehnen, T., Arnold, L. & La Mendola, S. Numerical Fire Spread Simulation Based on Material Pyrolysis—An Application to the CHRISTIFIRE Phase 1 Horizontal Cable Tray Tests. *Fire*, 2020. Vol. 3, nro. 3.

[10] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2020. 120 s. + liitt. 49 s. (NIST Special Publication 1018-1).

[11] Kallada Janardhan, R. & Hostikka, S. Predictive Computational Fluid Dynamics Simulation of Fire Spread on Wood Cribs. *Fire Technology*, 2019. Vol. 55, nro. 6, s. 2245–2268.

[12] Mangs, J. & Hostikka, S. Experimental characterization of the MCMK cable for fire safety assessment. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2013. 36 s. + liitt. 5 s. (VTT Research Report VTT-R-06873-12).

[13] Sikanen, T. PyroPython. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2019. Saatavilla: <https://github.com/PyroId/PyroPython>