

LIITE 1

Lausunnot

LAUSUNNOT



SISÄASIAINMINISTERIÖ
Pelastusosasto

LAUSUNTO

Rami Ruuska

2.6.2005

SM-2005-1559/Tu-33

SAAPINUT

Onnettomuustutkintakeskus
Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

09.06.05

186/54

Lausuntopyyntö 136/5Y, 29.4.2005

RÄJÄHDYSMÄINEN TULIPALO TERÄSTEHTAALLA TORNIOSSA 19.9.2003

Onnettomuustutkintakeskus on pyytänyt lausuntoa sisäasiainministeriön pelastusosastolta Torniossa sattuneen räjähdysmäisen tulipalon tutkintaselostuksen luonnoksesta.

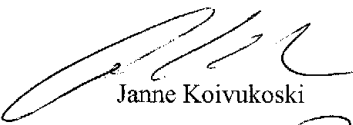
Sisäasiainministeriön pelastusosasto on tutustunut luonnokseen ja toteaa lausuntonaan seuraavaa:

Luonnoksessa useassa kohdassa mainittu termi ”peruslähtö” ehdotetaan korvattavaksi termillä ”pelastusjoukkue”. Peruste: Voimassa olevassa toiminta-ohjeessa A:71 pelastusjoukkue on vahvistettu määritelmäksi pelastusmuodostelmasta, joka koostuu johtajasta, vähintään kolmesta ja enintään viidestä pelastusyksiköstä.

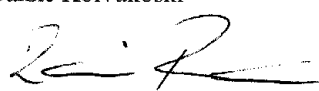
Sivulla 13, kohdassa 2 mainittu ”sisäasiainministeriön päivystäjä”, ehdotetaan korvattavaksi termillä ”sisäasiainministeriön päivystävä pelastusviranomainen”. Peruste: sisäasiainministeriössä on kolme päivystäjää (poliisiosastolla, raja-osastolla, pelastusosastolla).

Sivulla 75 kohdassa 3.4 mainitaan radiopuhelinliikenteen ongelmista. Käytössä on vielä tapahtumahetkellä ollut ilmeisesti vanha pelastustoimen radioverkko. Sisäasiainministeriön pelastusosasto haluaa tuoda esiin sen tiedossa olevana ongelman, että VIRVE puheryhmäliikennettä ei vielä toistaiseksi tallenneta kattavasti mihinkään ja se voi jatkossa vaikeuttaa onnettomuuksien tutkintaa olennaisesti.

Valmiusjohtaja


Janne Koivukoski

Ylitarkastaja


Rami Ruuska

TIEDOKSI

SM PEO, oey
Pelastusopisto
Lääninhallitusten pelastusosastot

Postiosoite
PL 26
00023 VALTIONEUVOSTO

Käyntiosoite
Kirkkokatu 12
HELSINKI

Puhelin
Vaihe (09) 16001
Sähköposti:
etunimi.sukunimi@intermin.fi

Faksi
(09) 1604 4672



LAUSUNTO

1.6.2005

Dnro

23/880/2005

SAAPUNUT

02.06.2005

168/57

Onnettomuustutkintakeskus

Sörnäisten rantatie 33C
00580 HELSINKI

Lausuntopyyntö 136/5Y, 29.4.2005

TUTKINTASELOSTUS

Kauppa- ja teollisuusministeriö on tutustunut Tornion terästehtaalla 19.9.2003 sattuneen räjähdysmäisen tulipalon tutkintaselostusluonnokseen ja esittää lausuntonaan seuraavaa.

Tutkintaselostusluonnoksen luvussa 5 on esitetty tutkintaseostukseen liittyvät suositukset. Suositukset on kohdistettu pääosin valvontaviranomaisille, vaikka suosituksissa esitetyt toimenpiteet kohdistuvat nimenomaan asianomaisiin yrityksiin. Kauppa- ja teollisuusministeriö esittää harkittavaksi, että suositukset osoitettaisiin nimenomaan asianomaisille yrityksille. Lisäksi valvontaviranomaisille voisi kohdistaa suosituksen, jonka mukaan valvontaviranomaiset omassa toiminnassaan edesauttavat ja valvovat suosituksissa esitettyjen ehdotusten toteuttamista.

Suosituksien mukaan kauppa- ja teollisuusministeriön tulisi huolehtia siitä, että EU-säädöksissä vaadittaisiin venttiilivalmistajia laatimaan ohjeet venttiilien soveltuvuudesta eri kaasuille. Alustavan tarkastelun perusteella kauppa- ja teollisuusministeriössä ei ole selvinnyt, mihin EU-säädökseen edellä mainittu vaatimus voitaisiin esittää liitettäväksi. Vaatimus on varsin yksityiskohtainen, joten olisi tarpeen selvittää, voitaisiinko vaatimus liittää mainittuja tuotteita koskeviin standardeihin.

Timo Kekkonen
osastopäällikkö

Tapani Koivumäki
teollisuusneuvos



TUKES
TURVATEKNIKAN KESKUS

27.5.2005

1837
183/06/2005

SAAPUNUT

3 1. 05. 2005

164/57

Onnettomuustutkintakeskus
Sömäisten rantatie 33 C

00580 HELSINKI

Tutkintaselostus terästehtaalla Torniossa sattuneesta tulipalosta

LAUSUNTO

Turvatekniikan keskus (TUKES) on vastaanottanut lausuntopyyntönne, joka koskee AvestaPolarit Stainless Oy:n (nyk. Outokumpu Stainless Oy) Tornion terästehtaalla 19.9.2003 sattuneen tulipalon tutkintaselostusta (B 5/2003 Y; luonnos 28.4.2005).

TUKESin arvion mukaan onnettomuuteen johtaneita tapahtumia ja syitä on selvitetty Onnettomuustutkintakeskuksen tutkimuksessa erittäin perusteellisesti. Tutkintaselostuksessa on tarkasteltu erityisesti ohjeistukseen liittyviä asioita. Näiden lisäksi on arvioitu turvallisuuskulttuurin merkitystä yrityksessä sekä opastus- ja koulutuskäytäntöä. Toiminnanharjoittajan lisäksi tutkintaselostuksessa on arvioitu myös viranomaisten toimintaa.

Tutkimuksen perusteella annetut suositukset koskevat vaarallisten työtehtävien tunnistamista ja niissä toimimista koskevaa ohjeistusta, poikkeamatilanteiden ohjeistamista, venttiilien valintaa, asennusta ja kunnossapitoa. Suositukset koskevat lainsäädäntöä, viranomaistoimintaa ja yrityksen toimintaa mainittujen asioiden varmistamisessa. TUKES pitää suosituksia oikeina ja tarpeellisina.

Onnettomuuden jälkeen TUKES on ottanut käyttöön allaolevan kuvan mukaisen uuden valvontamallin, jossa painotetaan turvallisuusriskien kannalta oleellisten vaatimusten viemistä käytännön toimintaan. Malli painottaa samoja tekijöitä, joita onnettomuustutkintakeskuksen tutkintaselostus suosittelee viranomaistoimintaan. Uutta mallia on käytetty jo yli sadalla laitostarkastuksella.



TURVATEKNIKAN KESKUS

PL 123 (Läsnäkatu 37)

00181 HELSINKI

puhelin 10213776

sähköposti

www.tukes.fi

erikseen: erikseen@tukes.fi

puhelin 109 61 671

faksi 109 605 474, yhtiön

109 6167 466, lähtövalvonta

109 6167 566, tuoteturvonta

TUKESin voimavaroilla ei voida tarkastaa teollisten tuotantolaitosten kaikkia teknisiä yksityiskohtia tai niihin liittyvää toimintaa. Kemikaalien teollista käsittelyä koskevien TUKESin tarkastusten päätavoitteena on varmistaa, että toiminnanharjoittajalla on teknisen turvallisuuden kannalta riittävät *menettelyt*, joilla toiminnanharjoittaja (1) tunnistaa toimintaa koskevat vaatimukset, (2) arvioi toimintaan liittyvät riskit, (3-5) määrittelee tekniikkaa, toimintaa ja tietämystä koskevat vaatimukset ja seuraa vaatimustenmukaisuutta sekä (6) puuttuu poikkeamiin ja hallitsee vaaratilanteet. (7) Tällaisilla turvallisuuteen sitoutuneilla johtamis- ja työmenettelyillä voidaan saavuttaa turvallisuutta kuvaavien mittarien kuten häiriö- ja tapaturmataajuuden kehittyminen myönteiseen suuntaan. Nämä periaatteet ovat keskeisiä myös happilaitteistojen turvallisuuden kannalta ja ne kattavat alihankkijoiden ohjeistuksen ja seurannan.

Yritysten yhteistoiminta on noussut esiin monissa laitoksia ja laitteistoja koskevilla onnettomuustapauksissa. Sekä suunnittelu- ja rakennusvaiheessa että käyttö- ja muutosvaiheissa on mukana useita yritystahoja. Tämä koskee myös Tornion terästehtaan onnettomuutta. TUKES on toteuttanut kahden viimeisen vuoden aikana useita tutkimus- ja kehityshankkeita, joilla tähdätään verkottuneen yritystoiminnan parempaan huomiointiin myös viranomaistoiminnassa.

TUKESin käsityksen mukaan tutkintaselostus voidaan julkistaa esitetyssä muodossa.

Ylijohtaja  Seppo Ahvenainen

Johtaja  Timo Okkonen

Tiedoksi: Kauppa- ja teollisuusministeriö (Tapani Koivumäki)

PHR/TO



SOSIAALI- JA
TERVEYSMINISTERIÖ

Työsuojeluosasto

LAUSUNTO

LAUSUNNUT STM/1183/2005

06.06.2005

176/54

Onnettomuustutkintakeskus

**TERÄSTEHTAALLA TORNIOSSA SATTUNEEN 19.9.2003 RÄJÄHDYSMÄISEN
TULIPALON TUTKINTASELOSTUSLUONNOS**

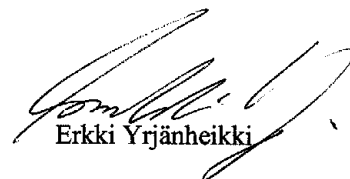
Onnettomuustutkintakeskus on pyytänyt lausuntoa em raportista ja siihen liittyvistä ehdotuksista sosiaali- ja terveysministeriöltä.

Sosiaali- ja terveysministeriö toteaa lausuntonaan asiakohdassa mainitusta ehdotuksesta seuraavaa. Sosiaali- ja terveysministeriö pitää työryhmän yksimielistä tutkimusselostusta hyvin perusteltuna sekä työryhmän tehtäväksiannon mukaisena. Työryhmässä oli edustettuna alan eri asiantuntija- ja viranomaistahot, mm. työsuojeluosaston asiantuntija. Suositusten esittämistapaan STM haluaa tehdä joitakin yleisiä ehdotuksia:

Suosituksista suurin osa on kohdennettu viranomaistahoihin, ainoastaan yksi ehdotus on suoraan kohdistettu toiminnanharjoittajaan Outokumpu Stainless Oy:hyn. STM:n näkemyksen mukaan esitettyjä suosituksia pitäisi kohdistaa enemmän myös toiminnanharjoittajille, joilla on ensisijainen vastuu toiminnan turvallisuudesta.

Ensisijaisesti viranomaisiin kohdistuvien suositusten tulisi perustua joko normistossa, lupa-/ valvontaviranomaistoiminnassa tai muussa viranomaistoiminnassa esiin tulleisiin puutteisiin.

Osastopäällikön sijainen,
johtaja


Erkki Yrjänheikki

Yli-insinööri


Erkki Reinikka



Postiosoite: PL 536, 33101 Tampere
Käyntiosoite: Uimalankatu 1, Tampere

Puhelin (03) 262 72000
Telekopio (03) 262 72499

Sähköposti:
Email: etunimi.sukunimi@stm.fi



POHJOIS-SUOMEN TYÖSUOJELUPIIRI

LAUSUNTO

Dno

1(1)

16.5.2005

177/01/2005

Onnettomuustutkintakeskus
Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

SAAPINUT

26.05.2005

159/54

Lausuntopyyntöne 136/5Y

LAUSUNTO TERÄSTEHTAALLA TORNIOSSA 19.9.2003 SATTUNEEN
RÄJÄHDYSMAISEN TULIPALON TUTKINTASELOSTUKSEN LUONNOKSESTA.

Pohjois-Suomen työsuojelupiiri on tutkinut yllä mainitun
suuronnettomuuden vaaratilanteen 28.4.2005 päivätyn
tutkintaselostuksen B 5/2003 Y luonnoksen, eikä ole havainnut siinä
huomautettavaa.

Piiripäällikkö


Pentti Pekkala

Ylitarkastaja


Hanna-Kaisa Rajala



HÄTÄKESKUSLAITOS
NÖDCENTRALSVERKET

LAUSUNTO

1 (1)

JAI

Kirjataan
27.5.2005

DNRO
38/1.6.1./2005

Onnettomuustutkintakeskus

Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

SAAPUNUT

3 1. 05. 2005

163/57

Lausuntopyyntö 29.4.2005

LAUSUNTO TUTKINTASELOSTUSLUONNOKSESTA

Lapin hätäkeskus esittää pyydettyä lausuntonaan Onnettomuuskeskuksen tutkintaselostusluonnoksesta (Räjähdysmäinen tulipalo terästehtaalla Tomiossa 19.9.2003) seuraavaa:

Kohta 2.4.1 Lapin hätäkeskus

Luonnoksen mukaan tehtaalla tapahtuneen onnettomuuden aikana oli hätäkeskuksessa työvuorossa vuoromestari ja kaksi hätäkeskuspäivystäjää.

Lapin hätäkeskus esittää, että em. lause muutetaan seuraavaksi, jolloin se vastaa todellista työvuorovahvuutta onnettomuuden tapahtumahetkellä:

Tehtaalla tapahtuneen onnettomuuden aikana oli hätäkeskuksessa työvuorossa vuoromestari ja kolme hätäkeskuspäivystäjää.

Muilta osin Lapin hätäkeskuksella ei ole tutkintaselostusluonnokseen lausuttavaa.

Hätäkeskuksen johtaja


Olavi Lampinen

Viestipäällikkö


Jukka Alenius

Osoite	Adress	Puhelin / Telefon	Faksi / Telefax	Internet	e-mail
Lapin hätäkeskus PL 1168 96101 ROVANIEMI	Laplands nödcentral PB 1168 96101 ROVANIEMI	(016) 333 7500	(016) 333 7503	www.112.fi	rovaniemi.virka@112.fi



LAPIN PELASTUSLAITOS
EMERGENCY SERVICE OF LAPLAND
Pelastusjohtaja

24.5.2005

SAAPUNUT

2 5. 05. 2005
158/5Y

ONNETTOMUUSTUTKINTAKESKUS
Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

Onnettomuustutkintakeskus 29.4.2005/136/5Y, tutkintaselostus B 5/2003 Y Luonnos

LAUSUNTO

Lapin pelastuslaitos ilmoittaa, ettei sillä ole huomautettavaa Tutkintaselostuksen B 5/2003 luonnokseen, joka käsittelee terästehtaalla Torniossa 19.9.2003 sattunutta räjähdysmäistä tulipaloa.


Martti Soudunsaari



OUTOKUMPU STAINLESS OY

LAUSUNTO

**OUTO
KUMPU**

SAAPUNUT

1 (3)
31.5.2005

03.06.2005

175/54

Johtaja Tuomo Karppinen
Onnettomuustutkintakeskus
Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

LAUSUNTOPYYNTÖNNE 29.4.2005 (136/5Y)

Outokumpu Stainless Oy on tutustunut Onnettomuustutkintakeskuksen laatimaan terästehtaalla Torniossa 19.9.2003 sattuneen räjähdysmäisen tulipalon tutkintaselostusluonnokseen.

1. Tutkinnan tavoitteena on ollut laatia turvallisuussuosituksia, joita toteuttamalla vastaavanlaisia onnettomuuksia voitaisiin välttää. Tutkintaselostuksessa ei siten ole tarkoitus käsitellä vastuukysymyksiä. Huolimatta siitä, että tutkintaselostus sisältää Outokumpu Stainless Oy:n ja sen toiminnan osalta virheellisyyksiä ja epätasällisyyksiä, niin tässä yhteydessä ei tutkinnan tavoite ja tutkintaselostuksen käyttötarkoitus huomioon ottaen ole perusteltua eikä tarkoituksenmukaista ryhtyä niitä laajemmalti käsittelemään.
2. Onnettomuustutkintakeskuksen suorittamissa varsinaisen perusteellisissa ja moniulotteisissa tutkimuksissa ja selvityksissä ei ole löydetty yksiselitteistä vastausta tulipalon syttymissyyn.
3. Onnettomuustutkintakeskus on esittänyt monia suosituksia ja parannusehdotuksia, joista Outokumpu Stainless Oy on jo monet toteuttanut. Parannettavaa monesti on - varsinkin silloin kun sattuu jotain yllättävää, jota eivät edes valvontaviranomaiset ja alan erityisasiantuntijat ole pitäneet mahdollisena.
4. Onnettomuustutkintakeskus on kohdistanut turvallisuussuosituksia myös alan asiantuntijaviranomaisille sekä välillisesti myös laitevalmistajille. Luvanvaraisessa toiminnassa valvontaviranomaisilla on parhaat mahdollisuudet edistää yritysten turvallisia toimintatapoja opastuksellaan ja ohjeistuksellaan, joka saattaa hyvinkin merkittäväällä tavalla poiketa aiemmasta viranomaisohjeistuksesta.
5. Outokumpu Stainless Oy pitää aiheellisena lyhyesti ottaa kantaa Tutkijalautakunnan selostukseensa liittämään Outokumpu Stainless Oy:n turvallisuustoiminnan tason arviointiin, joka on laadittu vuonna 2004 Onnettomuustutkintakeskuksen asiantuntijoiden toimesta. Nähdäksemme se ei anna täysin tosiasiallista kuvaa tehtaan turvallisuusasioiden tasosta ja tavoitteista.

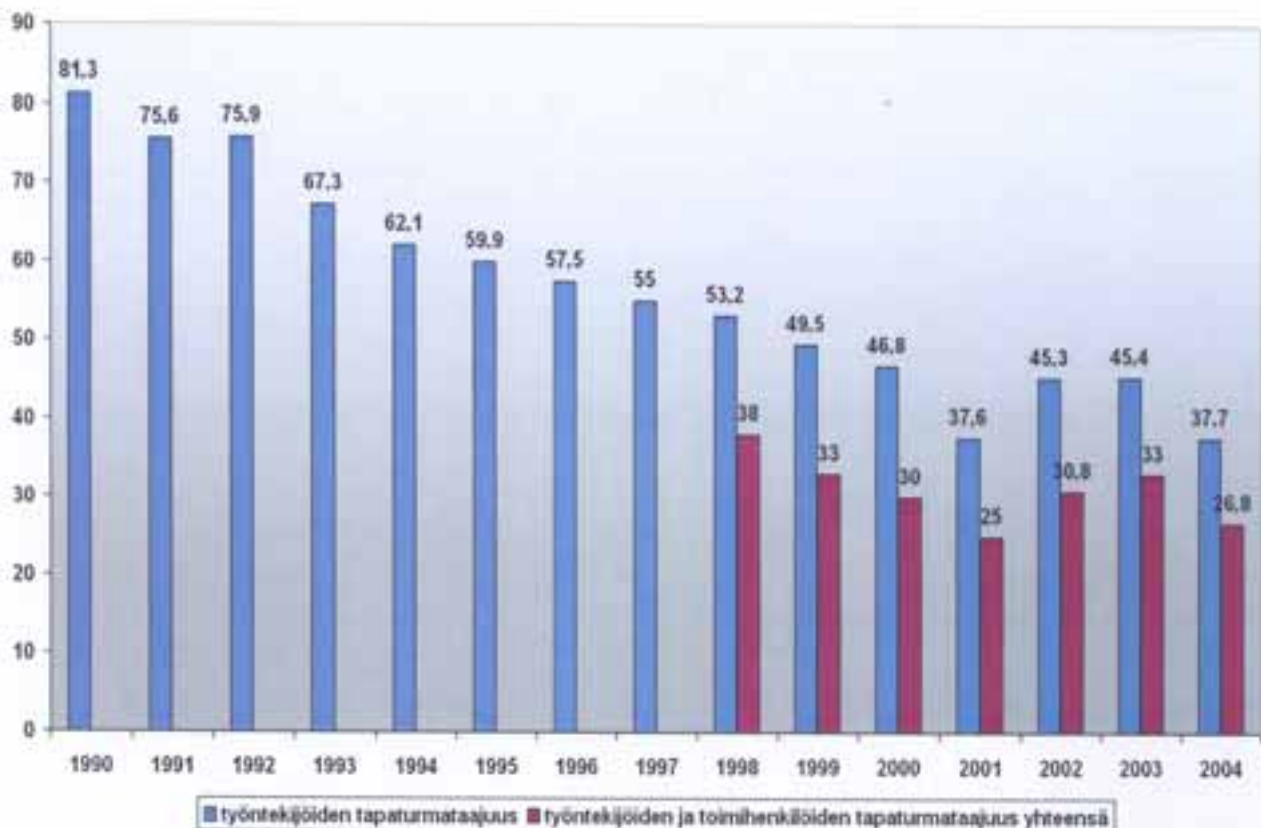
Outokumpu Stainless Oy

FI-95400 Tornio, Finland
Tel. +358 16 4521, Fax +358 16 452 620, www.outokumpu.com
Domicile: Tornio, Finland, Business ID 0823315-9, VAT FI08233159

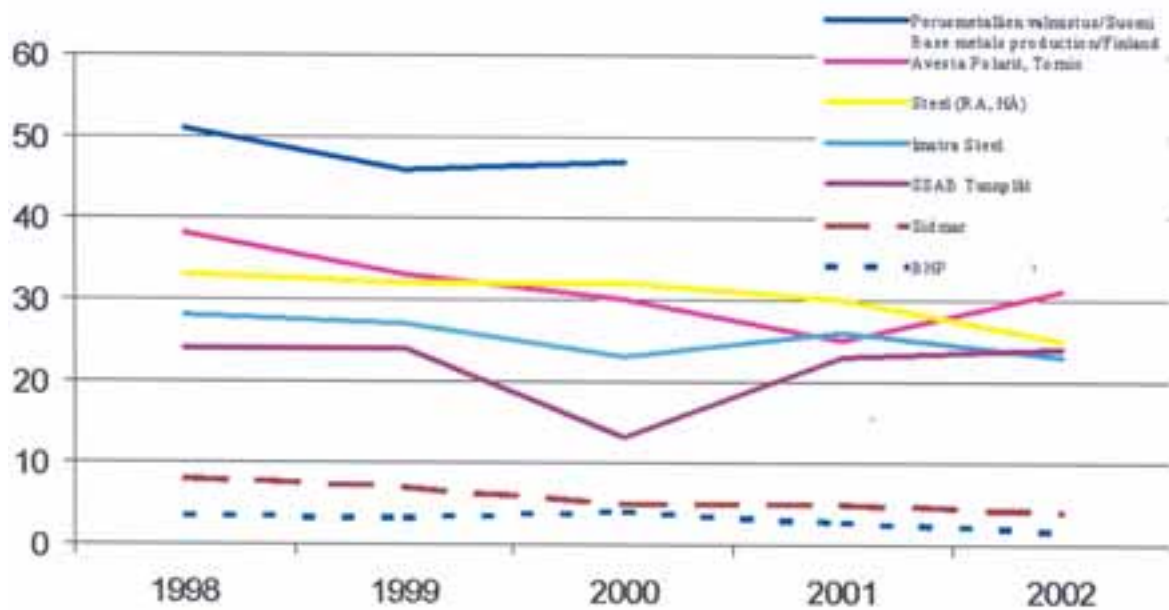
Outokumpu Stainless Oy:ssä turvallisuus on ollut aina tärkeä arvo jo outokumpulaisen perinteen vuoksi. Turvallisuuden kehittyminen on ollut voimakasta koko 90-luvun ajan. Esim. tapaturmataajuus parani 45 %:lla. Vuonna 1999 tapaturmataajuuden edelleen alentamiseksi taajuus otettiin yhdeksi strategiseksi mittariksi tavoitteena puolittaa se viidessä vuodessa. Tämän lisäksi yhtiö toteutti laajan konsernin työturvallisuuskampanjan vuonna 2000. Vuonna 2002 positiivisen kehityksen pysähtyttyä tehtiin uusi toimenpidesuunnitelma yhdessä henkilöstön kanssa ja tätä suunnitelmaa täydennettiin seuraavana vuonna.

Turvallisuustason arviointiraporttiin on liitetty tehtaan tapaturmataajuutta esittävä pylväsdiagrammi. Koska se antaa puutteellisen kuvan Tornion tehtaan tapaturmien pitkäaikaisesta kehitystrendistä, joka on ollut selvästi aleneva, esitämme ko. diagrammin korvaamista seuraavalla kaaviolla:

Tapaturmataajuus



Turvallisuustoiminnan tason arviointiraportissa Outokumpun tapaturmataajuuslukuja on verrattu Suomen metalliteollisuuden tapaturmataajuustasoon. Jotta yhtiöt olisivat vertailukelpoisia keskenään, Imatra Steelin ja Rautaruukin tapaturmataajuustilastoja tulee verrata edellisellä sivulla esitetyn kuvan punaisiin pylväisiin. Ohessa Rautaruukin ylläpitämä tilasto.



OUTOKUMPU STAINLESS OY

Niilo Suutala

Niilo Suutala
toimitusjohtaja

LIITE 2

Happiputkistojen syttymissyyt



HAPPIPUTKISTOJEN SYTTYMISSYYT

Kirjoittaja: Risto Lautkaski

Julkisuus: Luottamuksellinen



Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT Prosessit, Päästöjen hallinta PL 1606 02044 VTT Hankkeen vastuuhenkilö Risto Lautkaski Hankkeen asiakirjanumero (VTT) PRO3-0191T-03	Tilaaja Onnettomuustutkintakeskus Sörnäisten rantatie 33 C 00510 HELSINKI Tilaajan yhdyshenkilö Tuomo Karppinen Tilaajan tilaus- tai viitenumero 372/5 Y
Hankkeen nimi, lyhytnimi ja suoritettunnus Vaarallisten aineiden konsultoinnit 35VAKO2002, (C2SU02034)	Selostuksen numero ja sivumäärä PRO3/1031/03 38 s.
Päiväys 19.12.2003	

Tutkimusselostuksen nimi ja kirjoittajat HAPPIPUTKISTOJEN SYTTYMISSYYT Lautkaski, R.	
Tiivistelmä Kirjallisuustutkimuksessa on kerätty tietoja happiputkistojen syttymissyistä. Tietoa syttymissyistä on saatu sekä kokeista että sattuneita putkistopaloja tutkimalla. Ruostumaton teräs syttyy hapessa suunnilleen sulamislämpötilassaan (noin 1400 °C). Kokeissa, joissa on muodostettu tuore (hapetumaton) metallipinta, teräs on saatu pienellä sähkökipinällä syttymään huomattavasti alemmassa lämpötilassa (esim. 400 °C). Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kohtio on saatu syttymään, kun siihen on törmännyt happivirtauksen mukanaan kuljettamia rautahiukkasia (hiukkaskoko 50–150 µm) yli 50 m/s:n nopeudella. Metallit voivat syttyä myös hankauskitkan kuumentamina. Usein happiputkistojen metalli syttyy ns. syttymisketjun vaikutuksesta. Tällöin ensin syttyy putkiston epäpuhtaus (esim. öljy) tai tiiviste; useimmiten hapen kuumetessa adiabaattisen puristuksen seurauksena. Epäpuhtauden tai tiivisteen palamislämpötila hapessa on yleensä korkeampi kuin metallin syttymislämpötila. Palon leviämistä metallissa on tutkittu sytyttämällä metallipuikko alapäästään öljyllä. Kokeiden perusteella on määritetty ns. kynnyspaine (pienin hapen paine, jossa puikko palaa kokonaan). Kynnyspaineen soveltaminen happiputkistoihin on kuitenkin osoittautunut vaikeaksi. Tutkimuksessa on myös suuri- ja pieniläpimittaisten happiputkistojen palojen kuvauksia ja tutkinnan tuloksia.	
Jakelu: Tutkintalautakunnan jäsenet	Julkisuus luottamuksellinen

Hankkeen vastuuhenkilö Risto Lautkaski erikoistutkija	Tarkastus- ja hyväksymisallekirjoitukset Mikael Ohlström ryhmäpäällikkö
--	--

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Materiaalien valinta	1
3	Suunnitteluperiaatteet	3
4	Itsesyttyminen	6
5	Syttymissyyt	9
	5.1 Hankauskitka	11
	5.2 Adiabaattinen puristus	13
	5.3 Mekaaninen isku	15
	5.4 Hiukkasten törmäys	15
	5.5 Staattinen sähkö	18
	5.6 Valokaari	18
	5.7 Syttymisketju	18
6	Sattuneita onnettomuuksia	21
	6.1 Varoventtiilin palo	21
	6.2 Läppäventtiilin palo	22
	6.3 Palloventtiilin palo	23
	6.4 Pieniläpimittaisissa putkistoissa sattuneita onnettomuuksia	24
7	Yhteenveto	29
	Lähdeluettelo	33

1 JOHDANTO

Happiputkistojen palot ovat olleet ongelmana siitä lähtien, kun puristettua happea on alettu käyttää. Sitä mukaa kun tieto putkistopalojen syistä on lisääntynyt, tämä on pyritty ottamaan huomioon suunnittelustandardeissa ja käyttäjien koulutuksessa. Järjestelmällinen tutkimus happiputkistoissa sattuvista ilmiöistä alkoi kuitenkin vasta USA:n avaruushjelman yhteydessä.

Vuonna 1975 American Society for Testing and Materials (ASTM) asetti työryhmän (Committee G04) laatimaan standardeja hapella rikastetussa ilmassa käytettävien materiaalien valintaa varten. Työryhmä on tähän mennessä laatinut 20 standardia. Lisäksi työryhmä on järjestänyt yhdeksän kansainvälistä symposiota, joissa aiheeseen liittyviä tutkimuksia on esitelty. Kymmenes symposio järjestettiin marraskuussa 2003 Australiassa (ASTM 2003).

2 MATERIAALIEN VALINTA

Lähteessä (Anon. 1990) kuvaillaan periaatteita, joilla happijärjestelmien materiaaleja valitaan. Syttymisvaaraa havainnollistetaan usein ns. palokolmiolla, jonka kolme sivua ovat happi, palava aine ja sytytyslähde. Kun kaikki kolme tekijää ovat läsnä, kolmio on valmis ja syttyminen tapahtuu.

Vain harvat rakennemateriaalit eivät pala hapessa. Tällaisia ovat keraamiset oksidit ja jalometallit. Käytännössä joudutaan siis käyttämään palavia rakennemateriaaleja, jolloin palokolmion kaksi sivua ovat aina läsnä. Happipalo tarvitsee näiden lisäksi vain syttymislähteen.

Tavallisimmat happiputkistojen tapauksessa kysymykseen tulevat syttymislähteet ovat (Anon. 1990):

1. Hankauskitka. Esimerkiksi juoksupyörän hankaus pumpun pesää vasten on sytyttänyt neste-happipumpun palamaan.
2. Kaasun puristuminen, kun korkeapaineista happea johdetaan matalassa paineessa olevaan putkijaksoon. Esimerkiksi tyypipullon paineensäätimeen jäänyt öljy syttyi palamaan, kun säädin oli liitetty happipulloon.
3. Mekaaninen isku.
4. Happivirtauksen mukaansa tempaamat hiukkaset sytyttävät putken palamaan, kun ne törmäävät putken mutkaan tai muuhun virtauksen suuntaa muuttavaan osaan.
5. Staattisen sähköön purkaus.

Eri materiaalien syttymisherkkyys ja paloteho vaihtelevat suuresti. Mitä vaikeammin aine syttyy ja mitä pienemmällä teholla se palaa, sitä epätodennäköisempää on palon leviäminen materiaalissa tai viereisiin materiaaleihin. ASTM on laatinut useita standardeja happiputkistojen materiaalien testaamista varten (ASTM G 63-99):

1. Aineen palamislämpö mitataan kalorimetrillä hapessa, jonka paine on 25–35 bar, standardin ASTM D 4809 mukaan. Esimerkiksi polytetrafluoroeteenin (PTFE, teflon) palamislämpö on 6,4 MJ/kg.
2. Aineen itsesyttymislämpötila hapessa mitataan standardin ASTM G 72 mukaan. Menetelmässä hapen paine on enintään 207 bar ja lämpötila enintään 427 °C (800 °F). Esimerkiksi PTFE:n itsesyttymislämpötila on korkeampi kuin em. 427 °C ja tyypillisen hiilivetypohjaisen

- öljyn tai voiteluöljyn itsesyttymislämpötila on 180 °C.
3. Aineen happi-indeksi mitataan standardin ASTM D 2863 mukaan ilmakehän paineessa ja virtaavassa hapen ja typen seoksessa. Happi-indeksi eli rajahappipitoisuus on pienin (prosentteina lausuttu) hapen pitoisuus, jossa ylhäältä sytytetty koekappale palaa liekillä.
 4. Iskusytytyskoe tehdään standardin ASTM G 86 mukaan pudottamalla paino iskuripuikon päälle. Puikko tukeutuu koekappaleeseen. Kullakin pudotuskorkeudella koe toistetaan 20 kertaa. Tuloksena on korkein hapen paine, jolla koekappale ei syty suurimmalla pudotuskorkeudella, ja suurin pudotusenergia, jolla koekappale ei syty tietyllä hapen paineella.
 5. Puristuskuumennuskoe tehdään standardin ASTM G 74 mukaan sijoittamalla koekappale putkeen, joka paineistetaan nopeasti puristetun hapen säiliöstä. Tuloksena on alin paine, jossa materiaali syttyy adiabaattisesta kuumennuksesta.

Lähteessä (Anon. 1990) on myös yhteenveto happiputkistoissa yleisesti käytettävien komponenttien ja materiaalien ominaisuuksista:

- *Venttiilin istukka* voi syttyä adiabaattisen kuumennuksen, nopeiden hiukkasten törmäysten tai hankauskitkan vaikutuksesta (kun venttiiliä suljetaan). PTFE sekä PTFE-pohjaiset komposiittimateriaalit, joita on vahvistettu tai täytetty epäorgaanisilla aineilla, kestävät varsin hyvin näiden tekijöiden vaikutusta. Tosin joissakin tapauksissa nekin ovat syttyneet.
- *Pesätiiviste*. PTFE soveltuu erinomaisesti tähän tarkoitukseen, jos lämpötila on enintään 150 °C. Tiivisteiden kylmämyötö ei venttiilipesässä aiheuta ongelmia.
- *Laippatiiviste*. Monet materiaalit soveltuvat happiputkiston laippatiivisteiksi. Kuitenkin muut tekijät saattavat rajoittaa eri materiaalien soveltuvuutta. PTFE soveltuu hyvin happiputkistoissa käytettäväksi, mutta sillä on taipumusta kylmämyötöön, mikä voi johtaa vuotoon. Epäorgaanisilla aineilla vahvistetut tai täytetyt PTFE-pohjaiset komposiitit soveltuvat lähes yhtä hyvin happiputkistoissa käytettäväksi eivätkä ne ole yhtä alttiita kylmämyödölle.
- *Voiteluaineet*. Hiilivetypohjaiset öljyt ja voiteluaineet soveltuvat huonosti käytettäväksi happiputkistoissa. Ne syttyvät helposti ja niillä on korkea palamislämpö. Siksi ne eivät saa päästä kosketukseen hapen tai hapella rikastetun ilman kanssa. Ainoastaan halogenoidut hiilivedyt soveltuvat öljyjen ja voiteluaineiden raaka-aineiksi. Niillä on korkea itsesyttymislämpötila ja pieni palamislämpö.

Standardi ASTM G 63-99 opastaa suunnittelijaa epämetallisten materiaalien valinnassa happiputkistoille. Yleisesti ottaen huomiota tulisi kiinnittää seuraaviin seikkoihin:

- *Aineen syttymistä edistävät tekijät*: itsesyttymislämpötila hapessa, iskunkestävyys, muoto, ympäristö, mahdolliset epäpuhtaudet, huokoisuus, lämmönjohtavuus, hapettuminen ja lämmön siirtyminen pois kappaleesta. Esimerkiksi laippatiivisteeseen voidaan käyttää materiaalia, jolla on suhteellisen alhainen itsesyttymislämpötila, koska lämpö siirtyy tehokkaasti tiivisteestä laippoihin.
- *Palon leviämiseen vaikuttavat tekijät*: koostumus, muoto, alkulämpötila, paine, happipitoisuuden lasku palon aikana ja lämpöhäviöt.
- *Palovahinkoihin vaikuttavat ominaisuudet ja olosuhteet*: palamislämpö, happipitoisuus, virtausolosuhteet ennen syttymistä ja sen jälkeen sekä liekin etenemisominaisuudet.
- *Käyttöolosuhteet*: muut materiaalit ja niiden sijainti sekä hapen paine, lämpötila, pitoisuus, virtaus ja nopeus.
- *Paine*: paine vaikuttaa syttymismekanismeihin sekä vahinkoihin. Paineen noustessa palon etenemisnopeus kasvaa, materiaalin itsesyttymislämpötila alenee, iskuherkkyys kasvaa, hap-

pi-indeksi alenee, palamislämpö muuttuu vain vähän ja adiabaattisen kuumennuksen merkitys syttymissyynä kasvaa.

- *Lämpötila*: lämpötilan nousu kasvattaa syttymistodennäköisyyttä. Materiaalin itsesyttymislämpötilan ja korkeimman käyttölämpötilan välillä tulee olla riittävä varmuusmarginaali.
- *Syttymissyyt*: hankauskitka, adiabaattinen puristus, mekaaninen isku, hiukkasten törmäys, staattinen sähkö, valokaari, akustinen resonanssi, jatkuva nopea edestakainen taipuminen, virtauskitka, murtumat, ulkoiset lämmönlähteet.
- *Syttymisen seuraukset*: tapaturmat, toiminnan keskeytyminen, korjaustarve.
- *Muut perusteet*: mitoitusarvot, käyttökokemukset, saatavuus ja hinta.

Metallien soveltuvuutta happiputkistoihin on tutkittu seuraavilla testausmenetelmillä ASTM G 94-92):

1. *Kitkakuumennustestissä* metallinkappaletta pyöritetään ja puristetaan toista metallinkappaletta vasten hapessa. Muuttujina ovat puristuspaine, pyöritysnopeus sekä hapen paine. Testauksen kalleuden vuoksi menetelmää ei ole standardoitu.
2. *Hiukkasten törmäytestissä* yksi tai useampia hiukkasia kulkeutuu hapen virtauksen mukana päin koekappaletta. Ennen törmäystään koekappaleeseen hiukkaset ovat jo saattaneet törmäysten seurauksena kuumentua hehkuviksi. Hiukkaset voivat myös syttyä palamaan törmätessään koekappaleeseen. Muuttujina ovat hapen paine, lämpötila ja nopeus, hiukkasten materiaali, koko, lukumäärä ja törmäysnopeus. Testauksen kalleuden vuoksi menetelmää ei ole standardoitu.
3. *Indusoidun palamisen testissä* hapessa oleva koekappale sytytetään sopivalla sytyttimellä. Tästä testistä on useita muunnoksia. Sytytin voidaan standardoida ja hapen painetta tai koekappaleen lämpötilaa vaihdella, jolloin metallit, jotka eivät syty, ovat suositeltavampia kuin metallit, jotka syttyvät. Sytytysenergiaa voidaan vaihdella, jolloin metallit luokitellaan pienimmän syttymiseen tarvittavan energian perusteella. Voidaan myös käyttää niin suurta sytytysenergiaa, että kaikki tutkittavat metallit syttyvät, ja luokitella metallit palon etenemisnopeuden perusteella. Standardoitu testausmenetelmä on määritelty standardissa ASTM G 124-95.

Kukin testi antaa eri metalleilla hieman erilaisen soveltuvuusjärjestyksen. Yleisesti ottaen nikkelijä kuparipohjaiset seokset ovat rautapohjaisia parempia, kun taas alumiini- ja titaanipohjaiset ovat rautapohjaisia huonompia (Anon. 1990). Metallien palamislämpöä ei yleensä tarvitse mitata, koska se voidaan laskea seoksen koostumuksen perusteella (ASTM G 94-92).

3 SUUNNITTELUPERIAATTEET

Lähde (Anon. 1990) esittää myös happiputkistojen suunnittelun yleisiä periaatteita:

1. Suunnittele järjestelmä siten, että hapen lämpötila ei nouse tarpeettoman korkeaksi. Rajoita hapen syöttöpainetta siten, että paine putkiston eri osissa on mahdollisimman pieni.
2. Suunnittele järjestelmä siten, että sen puhdistus ja huolto on helppoa. Sijoita lujia ja hyvin paloa kestäviä suodattimia hapen tuloyhteiden lähelle, joiden luona voi irrota hiukkasia, sekä ennen kohtia, esim. kuristusventtiileitä, joissa happi virtaa suurella nopeudella.
3. Rajoita hapen virtausnopeutta ja käytä hyvin paloa kestäviä materiaaleja kohdissa, joissa virtausnopeuden täytyy olla suuri tai joissa kaasun virtaus törmää pintaan.

4. Käytä hitaasti avautuvia venttiileitä, pieniläpimittaisia ohitusventtiileitä ja virtauksen säätimiä välttääksesi putken nopean paineistumisen ja hapen puristumisen putken suljettua päätä vasten.
5. Varmista, että liikkuvilla osilla on riittävät välykset välttääksesi kitkan ja hankauksen.
6. Sijoita putkistoon valvontalaitteita prosessiolosuhteiden epäsuotuisten muutosten havaitsemista varten ja käytä automaattisia sulkuventtiileitä, jotka toimivat poikkeustilanteissa laakereita, lämmittimiä yms. laitteita valvovien anturien signaalista.
7. Varaudu suunnittelussa tulipalotilanteisiin sijoittamalla hapen varastosäiliöt etäälle, eristämällä tai suojaamalla kriittiset laitteet siten, että tulipalo tai räjähdys ei pääse leviämään, sekä sijoittamalla etäälle hätäpysäytyskytkimiä.
8. Varaudu hapen suunnitellun päästön ja vuodon seurauksiin lähialueella.

Stoltzfus, Dees ja Poe (1996) luettelevat happiputkistojen tyypillisiä komponentteja sekä niihin liittyviä ilmiöitä ja syttymissyitä:

- **Palloventtiili.** Hiukkasten muodostuminen (*hiukkasten törmäys*) ja nopea avautuminen (*adiabaattinen puristus*).
- **Varoventtiili.** Värähtely (*mekaaninen isku tai hankauskitka*).
- **Lautasventtiili.** Virtauseste myös auki ollessaan (*hiukkasten törmäys*).
- **Läppäventtiili.** Virtauseste myös auki ollessaan (*hiukkasten törmäys*).
- **Letku.** *Adiabaattinen puristus*, kun toinen pää on suljettu.
- **Säädin.** *Mekaaninen isku* ja suuri virtausnopeus (*hiukkasten törmäys*).
- **Vastaventtiili.** Värähtely (*mekaaninen isku tai hankauskitka*).
- **Suodatin.** Epäpuhtauksien *paineisku* suodattimeen sekä mahdollisesti *hiukkasten törmäys*, jos suodatin on sijoitettu huonoon paikkaan.
- **Putket.** Asennettavat putket tuovat putkistoon hiukkasia (*hiukkasten törmäys*).
- **Tiivistet.** Hapen virtauksen vaikutukset polymeereihin (*paineisku, mekaaninen isku, hiukkasten törmäys*).

Gunaji ym. (1995) esittävät eri tyyppisten materiaalien todennäköisimmät syttymissyöt seuraavasti:

- *epämetallit:* mekaaninen isku, adiabaattinen puristus, itsesyttyminen, akustinen resonanssi ja valokaari
- *metalli:* hankauskitka, hiukkasten törmäys ja valokaari.

He myös esittelevät esimerkkien avulla, miten happiputkistojen venttiilit ja muut varusteet tulisi suunnitella, jotta niiden syttymisen todennäköisyys käytön aikana olisi mahdollisimman pieni. Suositeltavia suunnitteluperiaatteita ovat mm. seuraavat:

- älä sijoita kohtisuoria metallipintoja kaasusuihkun tielle, jotta pintoihin törmäävät hiukkaset eivät sytyttäisi metallia palamaan
- älä sijoita jousen paikallaan pitämiä karatiivisteitä kohtiin, joissa kaasun virtaus voi saada karan värähtelemään
- eristä kierrelitokset virtaavasta hapesta, koska kierteistä irtoaa helposti metallihiukkasia
- suunnittele poraukset siten, että niihin ei tule epäpuhtauksia kerääviä "umpikujia".

Standardeissa ASTM G 63-99 ja ASTM G 94-92 on useita esimerkkejä happiputkistojen komponenttien materiaalien valinnasta. Valinta tehdään pisteytysmenetelmällä, jossa otetaan huomioon:

1. Syttymistodennäköisyys eri syistä (mekaaninen isku, kitka, hiukkasten törmäys, staattinen sähkö, valokaari, adiabaattinen puristus, sytytysketju, muu syy): 0 lähes mahdotonta ... 4 erittäin todennäköistä.
2. Syttymistä edistävät tekijät: iskunkestävyys, muoto, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, oksidikerros, kyky siirtää lämpöä viereisiin komponentteihin.
3. Palon etenemiseen vaikuttavat tekijät: koostumus, muoto, paine, lämpötila, palamistuotteiden olomuoto.
4. Palovahinkojen suuruuteen vaikuttavat tekijät: massa, palamislämpö, happipitoisuus, virtaukset ennen palon syttymistä ja sen jälkeen, palon etenemisnopeus.
5. Palon seuraukset (mahdolliset henkilövahingot, käyttökatkon kesto, korjaustarve): A vähäinen ... D katastrofaalinen.

Happiputkistojen suunnitteluopas (EIGA 2002) mainitsee seuraavat syttymismekanismit, jotka voivat johtaa putken murtumiseen:

- metalli- tai epämetallihiukkasten törmäminen putkiston metalliosiin
- hapen adiabaattinen puristus, akustinen resonanssi tai virtauskitka, joka nostaa lämpötilaa
- orgaanisten materiaalien tai virtauksen mukanaan kuljettamien epäpuhtauksien syttymisen aloittama syttymisketju
- hankauskatka esimerkiksi venttiilin liikkuvan ja kiinteän osan välillä
- staattisen sähköön kipinä metalliosien välillä
- ylikuumeneminen, joka johtuu joko prosessihäiriöstä tai happivuodon ylläpitämästä putkiston ulkopuolisesta palosta
- palavan aineen tahaton sekoittuminen hapen kanssa joko prosessihäiriön tai kunnossapito- tai muutostyön yhteydessä.

Yleisiä suunnitteluperiaatteita ovat:

- valitse sopivat epämetalliset materiaalit ja pidä niiden määrä mahdollisimman pienenä
- pidä happiputkisto puhtaana
- vältä hiukkasia esimerkiksi suodattamalla
- vältä erityisesti pölyloukkuja ja pintoja, joihin hapen virtaus törmää
- valitse sopivat metalliset materiaalit
- noudata hyvää laitteiden suunnittelu- ja sijoittelukäytäntöä
- rajoita palojen seuraukset mahdollisimman vähäisiksi sopivilla palontorjuntamenetelmillä.

Epämetallisten materiaalien osalta tulisi noudattaa seuraavia sääntöjä:

- upota epämetalliset komponentit paloa kestävien metalliosien keskelle, jotta lämpö pääsisi helposti siirtymään epämetallista metalliin
- vältä epämetallisten komponenttien sijoittamista kosketukseen virtaavan hapen kanssa
- estä komponenttien liiallinen liikkuminen
- varmista, että materiaali on fysikaalisesti ja kemiallisesti stabiili prosessiolosuhteissa
- varmista, että epämetallinen komponentti ei eristä metalliosia toisistaan.

Metalliosien valinnassa ohje erottelee osat, jotka ovat alttiina hiukkasten törmäyksille (impingement sites), ja osat, jotka eivät ole (non impingement sites). Kummallekin ryhmälle määritellään suurin sallittu hapen virtausnopeus, joka riippuu hapen paineesta P [bar] taulukossa 1 esitetyllä tavalla. Virtausnopeus tarkoittaa putken poikkipinnan tai komponentin pienimmän poikkipinnan yli laskettua keskimääräistä nopeutta. Vikojen (esim. säätöventtiili) tai muiden poikkeustilanteiden (esim. varoventtiilin puhallus) yhteydessä esiintyviä nopeuksia ei oteta huomioon.

Taulukko 1. Suurin sallittu hapen virtausnopeus (EIGA 2002)

paine, bar	hiukkaset törmäävät	hiukkaset eivät törmää
3–15	30 m/s	60 m/s
15–100	(450 bar·m/s)/P	(800 bar·m/s)/P
100–200	4,5 m/s	8 m/s

Osia, jotka ovat alttiina hiukkasten törmäyksille, ovat mm.

- T-haarat, muhvihitsatut haarat ja käyrät
- pienen kaarevuussäteen (alle 1,5D) käyrät, segmentoidut käyrät (kulmat suurempia kuin 20°)
- putkisupistukset (enemmän kuin 3:1)
- eristys-, säätö-, kuristus-, pikasulku-, ohitus-, ilmaus-, varo- ja vastaventtiilit
- sihdit ja suodattimet
- kuristus- ja mittauslaipat
- äänenvaimentimet
- ohitus- tai paineenalennusventtiilin jälkeinen putki etäisyydelle 8D asti.

Osia, joita eivät ole alttiita hiukkasten törmäyksille, ovat mm.

- suorat putkijaksot
- puskuhitsatut suuren kaarevuussäteen haarat
- suuren kaarevuussäteen (vähintään 1,5D) käyrät, segmentoidut käyrät (kulmat pienempiä kuin 20°)
- putkisupistukset (enintään 3:1).

Jos hapen virtausnopeus on pienempi kuin taulukosta 1 laskettu suurin sallittu nopeus, voidaan käyttää mitä tahansa metallia, esimerkiksi hiiliterästä. Jos virtausnopeus on tätä suurempi, on käytettävä jotain ohjeen (EIGA 2002) liitteessä C mainittua metallia. Liitteen C metallit on testattu standardin ASTM G 124-95 mukaisella indusoidun palamisen testillä. Testit on tehty käyttämällä koekappaleena halkaisijaltaan 3,2 mm:n puikkoa. Eräät metallit (esimerkiksi ruostumaton teräs AISI 316) on lisäksi testattu 6,4 mm:n puikolla.

Ohjeen liitteessä D on annettu testauksen perusteella määritellyt hapen kynnyspaineet (pienin hapen paine, jossa alapäästään sytyttimellä sytytetystä puikosta, jonka pituus on 100–150 mm, palaa vähintään 30 mm). Esimerkiksi ruostumattomalla teräksellä AISI 316 kynnyspaineeksi on saatu 14 bar (3,2 mm:n puikko) ja 20 bar (6,4 mm:n puikko). Ohjeen mukaan hapen virtausnopeutta ei tarvitse rajoittaa, jos hapen paine on enintään kynnyspaine. Tällöin metalliosan paksuuden tulee olla vähintään kynnyspainetta vastaavan puikon halkaisijan suuruinen. Jos metalliosa on tätä ohuempi tai hapen paine kynnyspainetta korkeampi, virtausnopeus ei saa ylittää taulukon 1 arvoa.

4 ITSESYTTYMINEN

Palavat aineet syttyvät itsestään ilmassa ja hapessa, kun niiden lämpötila on tarpeeksi korkea. Tätä lämpötilaa kutsutaan itsesyttymislämpötilaksi tai syttymislämpötilaksi. Useimpien kaasujen ja nesteiden itsesyttymislämpötila hapessa on vain vähän alempi kuin ilmassa (NFPA 53, s. 35).

Metallien itsesyttymislämpötilat ovat paljon korkeampia kuin kysymykseen tulevat käyttölämpötilat. Metallien itsesyttymislämpötilan määrittämistä varten ei ole standardoitua testausmenetelmää. Lisäksi testaukseen liittyy useita ongelmia, jotka rajoittaisivat testaustuloksen soveltamista: koekappaleen koon, muodon ja lähiympäristön sekä oksidikerroksen vaikutus, lämpötilan mittausongelmat sekä vaikeus päätellä, milloin koekappale on syttynyt.

Metalli voi syttyä huomattavasti alemmassa lämpötilassa, jos sen oksidikerros on vahingoittunut esimerkiksi säröilyn, hankauksen tai kulumisen seurauksena. Metalleista ainoastaan titaani on osoitettu syttyvän hapetusreaktion lämmöstä, kun pintaa suojaava oksidikerros poistetaan ja tuoreelle metallipinnalle muodostuu uusi oksidikerros. Kuitenkin toisilla metalleilla tuoreen pinnan paljastuminen saattaa helpottaa syttymistä hankauskitkan, hiukkasten törmäyksen ym. tekijöiden vaikutuksesta (ASTM G 94-92).

Tuoreen metallipinnan on arveltu aiheuttaneen useita kompressoripaloja, kun kompressorin on otettu käyttöön inerttikaasulla ja sitten siirrytty käyttämään happea. Tällöin kompressorin on oletettu kertyneen paljon metallihiukkasia, joilla on tuore pinta. Lisäksi toisiaan vastaan hankautuville pinnoille ei inerttikaasulla muodostu oksidikerrosta, minkä vuoksi hankauskitka saattaa olla suurempi kuin kompressorin toimiessa hapella (ASTM G 145-96).

Bates ym. (1979) ovat tutkineet raudan ja teräksen syttymistä virtaavassa puristetussa hapessa. Hapen lämpötila oli 150–260 °C, paine 68 bar ja virtausnopeus noin 430 m/s. Koekappaleina käytettiin metallipuikkoja, joiden halkaisija oli 1,0, 1,5 ja 2,0 mm ja pituus 32 mm. Puikon keskiosan halkaisija 9 mm:n pituudelta oli 3/4 päiden halkaisijasta. Osassa kokeista puikon keskikohta oli lovettu. Puikko oli molemmista päistään kiinnitetty kupariputkeen.

Puikkoa kuumennettiin johtamalla se läpi sähkövirta. Kun haluttu lämpötila oli saavutettu, puikko katkaistiin kiertämällä sitä yläpäätä. Samalla puikon ylempää puoliskoa nostettiin 2,5 mm. Tällöin puikon puoliskojen välisessä raossa iski pieni sähkökipinä.

Kokeessa tutkittiin neljää ruostumatonta terästä: AISI 304, AISI 410, 17-4 PH ja ASTM A296. Kun puikkoa ei katkaistu, yksikään näistä materiaaleista ei syttynyt edes 815 °C:n lämpötilassa. Tästä pääteltiin, että syttymisen edellytyksenä on joko puikon murtuminen ja tuoreen metallipinnan hapettuminen tai sähkökipinä. Korkea lämpötila ja puristetun kuuman hapen virtaus eivät yksinään riittäneet sytyttämään puikkoja. Myöhemmässä julkaisussa (Monroe, Bates & Pears 1983) todetaan, että sähkökipinä epäilemättä vaikutti puikon syttymiseen, mutta ei enää sen palamiseen.

Ruostumaton teräs AISI 304 saatiin palamaan 538 °C:n lämpötilassa, kun hapen paine oli 20,7 bar. Kun paine nostettiin 34,5 baariin, teräs saatiin palamaan lämpötilassa 400 °C. Paineessa 69 bar, tämä lämpötila oli 315 °C. Muilla ruostumattomilla teräksillä saatiin suunnilleen samanlaisia tuloksia. Lämpötilat eivät riippuneet puikon halkaisijasta.

Nguyen ja Branch (1987) ovat tutkineet kolmen metallin, mm. ruostumattoman teräksen AISI 302, itsesyttymistä hapessa. Koekappaleena oli lieriö, jonka halkaisija ja korkeus olivat 5 mm. Lieriö puhdistettiin asetonilla, mutta sen oksidikalvoon ei koskettu. Koekappale sijoitettiin kammioon, joka paineistettiin hapella enintään 69 baarin paineeseen. Lieriön yläpintaan kohdistettiin hiilidioksidilaserin säde ja pinnan lämpötila mitattiin pyrometrillä sekä lämpöpareilla. Kuumennuksen aikana pinnalle muodostui rosainen oksidikalvo, jonka paksuus kasvoi. Lieriön syttyminen havaittiin sen pintalämpötilan nopeasta noususta. Syttymislämpötila oli kaikilla hapen paineen arvoilla ruostumattoman teräksen AISI 302 sulamisalueella 1399–1421 °C.

Venäjällä on tutkittu hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen itsesytytystä hapessa. Bolobov ym. (1991) ovat tutkineet venäläisen 12H18N10T -ruostumattoman teräksen syttymistä hapessa. Hapen paine vaihteli 2–700 bar. Kokeissa käytettiin kolmea menetelmää:

1. Pystysuoraa teräspuikkoa (halkaisija 3 mm, pituus 100 mm) kuumennettiin sähkövirralla. Puikon kuumimman osan lämpötila mitattiin siihen ns. saumattomalla menetelmällä kiinnitettyllä lämpöparilla. Lämpötilan mittausrvirhe oli enintään 25–30 K. Tällä tavalla koekappaleen lämpötilaa voitiin nostaa jopa 600 K/s. Hapen lämpötila oli noin 27 °C.
2. Lieriömäisiä tai suorakaiteen muotoisia koekappaleita (korkeus 0,2–5 mm) kuumennettiin hapella, jonka lämpötila vaihteli 27–1450 °C. Hapen ja koekappaleen lämpötila nousi enintään 15–20 K/s. Lämpötilan mittaustarkkuus oli 10 K.
3. Pystysuoraa teräspuikkoa (halkaisija 3 mm, pituus 100 mm) kuumennettiin sähkövirralla tai hapella. Puikon keskikohta oli kavennettu. Lämpöpari on kiinnitetty lähellä kavennusta. Joussi puristi puikkoa pituussuunnassa. Puikon kuumentuessa sen murtolujuus aleni ja puikko katkesi kavennuksen kohdalta. Jousen puristusta säätämällä puikon katkeamislämpötilaa vaihdeltiin 600–1200 °C.

Materiaalin sulamispiste määritettiin kuumentamalla puikkoa inerttikaasussa. Kahdella ensimmäisellä menetelmällä hapessa kuumennettu puikko syttyi hieman sulamispistettä alemmassa lämpötilassa. Tämä osoitti, että ruostumattoman teräksen pinnalle kuumentamisen aikana muodostunut oksidikalvo estää happimolekyyliä diffundoitumasta teräspintaan ja näin estää tehokkaasti terästä syttymästä korkeissakin hapen paineissa.

Kun sähköllä kuumennettujen koekappaleiden lämpötila nousi sulamispisteeseen, koekappaleet syttyivät kaikilla hapen paineilla. Syttyminen johtui siitä, että sulan hapen pinta pääsi kosketukseen hapen kanssa. Kun vastaavat kokeet tehtiin ilmassa ja inerttikaasussa, murtumakohdassa havaittiin sulaa metallia.

Murtuminen tapahtui alle sekunnissa. Ruostumattoman teräksen mitattu syttymislämpötila 1360 ± 30 °C oli käytännöllisesti katsoen sama kuin kokeessa mitattu sulamislämpötila. Lämpötila ei riippunut paineesta, joka vaihteli 2–700 bar.

Kun koekappaleita kuumennettiin hapella, syttymislämpötila oli jopa 100 K sulamispistettä korkeampi. Näin kävi, kun oksidikalvo oli tarpeeksi paksu ja koekappaleen korkeus pieni. Koekappaleiden tutkimus osoitti, että oksidikalvo piti aluksi sulan metallin sisällään. Tämä viittaa siihen, että koekappale syttyy siinä vaiheessa, kun sula metalli pystyy tunkeutumaan oksidikalvon lävitse. Tällä perusteella syttymislämpötila olisi oksidikalvon pääkomponentin sulamispiste, esim. Fe₂O₃:lla 1460 °C.

Kolmannella menetelmällä saatiin puikon syttymislämpötilalle, kun koekappaletta kuumennettiin hapella (paine P), sovituseluseke 1230 °C - $25,4(P/\text{MPa})^{1/2}$. Kun koekappaletta kuumennettiin sähkövirralla, syttymislämpötila laski jyrkemmin hapen paineen noustessa. Tämä johtui koejärjestelyistä: murtumakohtaan muodostunut valokaari kuumensi murtumapintoja paikallisesti.

Hydraulinesteiden ja voiteluöljyjen itsesytytyslämpötila voi hapessa olla 50–150 K alempi kuin ilmassa (NFPA 53, s. 35).

McQuaid, Sheets ja Bieberich (1983) ovat mitanneet hiilivetypohjaisen höyryturbiinien voiteluöl-

jyn itsesyttymislämpötilan riippuvuutta hapen paineesta ja epäpuhtauksista. Kun mittaukset tehtiin puhtaassa hapessa ja ilmakehän paineessa, itsesyttymislämpötila oli 240 °C. Ylipaineen noustessa itsesyttymislämpötila laski seuraavasti: 235 °C (4 bar), 220 °C (9 bar), 200 °C (19 bar), 190 °C (102 bar). Epäpuhtauksien vaikutusta tutkittiin 102 baarin paineessa. Ruostumattoman teräksen AISI 316 hiukkaset laskivat itsesyttymislämpötilaa 6 K, ruostehiukkaset 23 K ja näiden seos 12 K.

Chou ja Fiederowicz (1997) vertailevat kolmea testausmenetelmää, joilla eri polymeerien soveltuvuutta happiputkistoihin on tutkittu. Menetelmien korkein testauslämpötila oli 400, 425 tai 450 °C. Millään menetelmällä PTFE ei syttynyt, kun hapen paine oli 100–345 bar.

Shelley, Janoff ja Pedley (1993) ovat tutkineet öljyepäpuhtauden vaikutusta PTFE-tiivistysnauhan itsesyttymislämpötilaan hapessa. Nauhan leveys oli 12,5 mm ja paksuus 0,1 mm. Nauhasta otettiin 107 cm:n pätkä (massa 1 g), joka taiteltiin kasaan ja jota kuumennettiin pyrolyysiuunissa paineetomalla hapella. Hapen lämpötilaa nostettiin 10 K/min. Kuumennuksessa muodostuneet kaasut analysoitiin. PTFE:n sulamispiste on 327 °C. Kaasumaisia pyrolyysituotteita (CO₂ ja COF₂) alkoi muodostua lämpötilassa 450 °C ja näyte syttyi lämpötilassa 525 °C.

Epäpuhtauden vaikutusta tutkittiin laittamalla öljytippa nauhalle ja taittamalla nauha siten, että tippa jäi taitoksen sisään. Pienin öljykalvon paksuus, joka alensi PTFE:n itsesyttymislämpötilaa, oli 2400 mg/m². Vastaava itsesyttymislämpötila 285 °C oli sama kuin puhtaalla öljyllä.

Barthelemy ja Vagnard (1988) antavat kahdeksan PTFE-tuotteen itsesyttymislämpötilojen vaihtelualueeksi 472–500 °C. Shelley, Wilson ja Beeson (1997) antavat PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi 512–527 °C. Bryan ym. (2000) ovat mitanneet kymmenen polymeerin itsesyttymislämpötilan hapessa eri paineilla. PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi 34 baarin paineessa on saatu 418 °C.

5 SYTTYMISSYYT

Stoltzfus, Dees ja Poe (1996) kehottavat happiputkistojen suunnittelijoita ottamaan huomioon yhdeksän syttymismekanismia:

1. *Hankauskitka*. Putkiston komponentit hankaavat toisiaan vasten. Kuumen kohta saavuttaa kyseistä hapen painetta ja pitoisuutta vastaavan syttymislämpötilan. Esimerkiksi pyörivät tai edestakaisin liikkuvat komponentit sekä värähtelevä varoventtiilin lautanen.
2. *Adiabaattinen puristus*. Happi puristuu alhaisesta korkeaan paineeseen kuumentuen samalla. Puristuvan hapen määrällä ei ole merkitystä. Korkea lämpötila sytyttää polymeerimateriaalit tai syttyvät epäpuhtaudet. Esimerkiksi korkeapaineisen happiputkiston suljetussa päässä oleva venttiili tai polymeerillä pinnoitettu letku.
3. *Mekaaninen isku*. Kappale, jolla on riittävän suuri massa tai liikemäärä, voi aiheuttaa muodonmuutoksen ja paljastaa tuoreen metallipinnan. Esimerkiksi magneettiventtiilin lautanen iskee polymeeritiivisteeseen.
4. *Hiukkasten törmäys*. Syttyvät hiukkaset törmäävät materiaalin pintaan yli 50 m/s:n nopeudella. Tällöin hiukkaset ja/tai materiaali syttyvät. Esimerkiksi putken epäpuhtaudesta irronneet hiukkaset törmäävät venttiilin nostimeen.
5. *Jännitys tai värinä*. Huonosti lämpöä johtavat materiaalit (esimerkiksi muovit) voivat kuumeta syttymislämpötilaansa jännityksen tai värinän vaikutuksesta. Esimerkiksi putkiston sisään tunkeutuvat kannakoimattomat liitokset.

6. *Staattinen sähkö.* Staattisen sähköön purkaus voi toisinaan kuumentaa materiaalin syttymislämpötilaansa. Esimerkiksi kuivan hapen virtauskitka voi kerätä staattista varausta epämetalliin.
7. *Valokaari.* Valokaaren energia voi sytyttää hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi oikosulku eristetyssä sähkölämmittimessä purkautuu vaipan lävitse happeen.
8. *Kemiallinen reaktio.* Happiputkiston ulkopuolinen kemiallinen reaktio voi tuottaa riittävästi lämpöä sytyttääkseen hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi kemiallisen prosessin tuottama lämpö.
9. *Akustinen resonanssi.* Suljettuun tilaan muodostuvat akustiset värähtelyt voivat nopeasti nostaa hapen lämpötilaa. Lämpötila nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman arvon, jos mukana on hiukkasia. Jos lämpö ei pääse nopeasti johtumaan pois, se voi sytyttää materiaalin. Esimerkiksi happi virtaa T-kappaleeseen, jonka toinen haara on suljettu.

ASTM:n työryhmän jäsen Lori Kubinski (2003) luettelee myös yhdeksän syttymissyitä. Hän mainitsee kaksi syytä, joita Stoltzfusin, Deesin ja Poen (1996) luettelossa ei ole:

10. *Virtauskitka.* Hapen virtaus saa polymeerimateriaalin värähtelemään, jolloin sen lämpötila nousee paikallisesti syttymislämpötilaan. Esimerkiksi esiin pistävä, väärän kokoinen laippatiiviste.
11. *Syttymisketju.* Helposti syttyvän materiaalin palamisen tuottama lämpö sytyttää vaikeammin syttyvän materiaalin.

Syttymisketjun (kindling chain) ohella ilmiöstä käytetään myös nimeä indusoitu sytytys (induced ignition) tai indusoitu palaminen (induced combustion). Syttymisketju liittyy hieman erilaiseen tarkastelutapaan: tarkastellaan, miten tietty melko vaikeasti syttyvä materiaali (esimerkiksi teräs) voi syttyä. Stoltzfusin, Deesin ja Poen (1996) luettelossa taas tarkastellaan ensimmäisen syttymisen syytä.

Standardi ASTM G 94-92 huomauttaa, että muutkin syyt ovat saattaneet sytyttää happiputkistojen paloja tai osaltaan vaikuttaa niiden syttymiseen. Tekijät voivat olla joko ulkoisia (esimerkiksi hitsauksen metalliroiskeet) tai sisäisiä (esimerkiksi metallin murtuminen).

Korkeassa paineessa kaasu diffundoituu elastomeeriin. Kun paine alenee nopeammin kuin kaasu diffundoituu ulos, elastomeeri turpoaa tilavuudeltaan jopa kaksinkertaiseksi. Jos sisäinen paine tällöin ylittää murtolujuuden, elastomeeri repeää. Tähän tapahtumaan liittyvät ilmiöt (repeäminen, kitka, suuri kaasun virtausnopeus jne.) ovat todennäköisiä syttymissyitä. Eräät tiivisterenkaiden suunnitteluohjeet mainitsevat elastomeerin repeämisen hapen paineen laskiessa todennäköiseksi syttymissyiksi. ASTM:n työryhmä G04 ei kuitenkaan ole löytänyt ilmiöön liittyvää alkuperäisaineistoa eikä tietoa laboratoriokokeista, joissa elastomeeri olisi saatu syttymään tällä tavalla (ASTM G 145-96).

Standardi ASTM G 128-02 huomauttaa, että polymeerit voivat vanhetessaan muuttua huokoisiksi tai haurastua. Tällöin ne voivat kerätä epäpuhtauksia tai murtua, jolloin ne voivat toimia syttymisketjun ensimmäisenä lenkinä. Polymeerien kulumisen voi tuottaa hiukkasia tai johtaa murtumiin. Metalliosat voivat murtua, jolloin niiden iskut voivat sytyttää komponentteja. Hankaus (esimerkiksi kompressorissa) voi tuottaa riittävästi kitkalämpöä sytyttämään komponentteja ja voi myös muodostaa hiukkasia, jotka syttyvät välittömästi tai myöhemmin törmäyksen seurauksena. Tiivisteiden murtuminen voi johtaa putkiston nopeaan paineistumiseen, johon liittyy hapen adiabaattinen kuumeneminen.

Kaasumaisten sekä nestemäisten orgaanisten kemikaalien pienin syttymisenergia ilmassa vaihtelee 0,1–3 mJ. Sen sijaan hapessa pienin syttymisenergia on vain noin sadasosa tästä (NFPA 53, s. 36). Hiomalaikan synnyttämät kipinät eivät pystyneet sytyttämään ilmaan sekoittunutta kemikaalin höyryä, jonka pienin syttymisenergia on 0,3 mJ. Sen sijaan hapessa ne pystyivät sytyttämään kankaan palamaan. Tämän arvellaan johtuvan hiomapölyn reaktiosta hapen kanssa. Kipinä, joka syntyy, kun karkaistusta teräksestä valmistetulla työkalulla isketään ruosteiseen teräslevyyn, pystyy hapessa sytyttämään puuvilla- ja villakankaat (NFPA 53, s. 38).

5.1 HANKAUSKITKA

Jenny & Wyssmann (1983) tutkivat happikompressorien valmistusmateriaalien syttymistä hapessa hankauskitkan kuumennuksen vaikutuksesta. Koelaitteessa tutkittavasta materiaalista valmistuttua sauvaa puristettiin holkin muotoista vastakappaletta vasten ja samalla sauvaa pyöritettiin. Kosketuspinnat olivat katkaistun kartion muotoisia. Holkin sisään jäävä tila paineistettiin tyypellä 10 baarin tai hapella 50 baarin paineeseen. Rajapinnan lämpötila mitattiin pyrometrillä.

Sauvan valmistusmateriaalina oli ruostumaton teräs AISI 403 ja vastakappaleen pallografiittivalurauta ASTM A 536. Tyypellä tehdyssä kokeessa lämpötila saavutti tasapainoarvonsa 5–15 s:ssä. Puristusvoiman arvoilla 630–1050 N tämä lämpötila oli noin 1100 °C. Hapella tehdyissä kokeissa ja puristusvoiman arvoilla 590–760 N vastaava lämpötila oli noin 1200 °C. Puristusvoiman arvolla 1060 N sauva syttyi 6 s:n kuluttua lämpötilassa 1350 °C.

USA:n avaruusohjelman yhteydessä kehitettiin testausmenetelmä, jolla metallit voitiin luokitella kitkakuumennuksen kestoja perusteella. Menetelmässä käytettiin kahta tutkittavista metalleista valmistettua putken pätkää, jotka puristettiin toisiaan vasten. Toinen putken pätkä oli kiinteä ja toista pyöritettiin nopeudella 1000–20 000 kierrosta minuutissa. Putkien ulkohalkaisija oli 25 mm ja sisähalkaisija 20 mm. Putkien kosketuspinta oli noin 1,8 cm².

Putket olivat kammiossa, joka paineistettiin hapella 7–207 baarin paineeseen. Kun koekappaleiden lämpötila ylitti 925 °C, se voitiin mitata pyrometrillä (Benz & Stoltzfus 1986). Hapen lämpötila mitattiin 1,3 mm:n etäisyydellä koekappaleista (Schoenman, Stoltzfus & Kazaroff 1987).

Kokeet tehtiin seuraavasti:

1. Koekappaleet kiinnitettiin paikoilleen ja kammio paineistettiin hapella haluttuun paineeseen.
2. Pyöritysnopeus säädettiin haluttuun arvoon.
3. Koekappaleet painettiin vastakkain ja niiden puristusta kasvatettiin nopeudelle 0,17 MPa/s kunnes ne syttyivät tai murtuivat tai puristuksen suurin arvo saavutettiin.
4. Koekappaleet irrotettiin ja tutkittiin.

Toisissa kokeissa kammion painetta ja koekappaleen pyöritysnopeutta vaihdeltiin. Metallien luokiteluperusteeksi valittiin se puristusvoiman P ja kosketuspinnan keskimääräisen nopeuden v tulo Pv arvo, jolla koekappale syttyi palamaan. Tämä suure riippui hapen paineesta.

Esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistettua koekappaletta ei saatu syttymään Pv :n arvoilla 35–100 MPa·m/s, kun hapen paine oli 34,5 bar. Seuraavat kokeet tehtiin hapen paineella 69 bar, jolloin koekappale syttyi Pv :n arvoilla 45–60 MPa·m/s. Kun koekappaleiden syttymiseen johtaneet Pv :n arvot piirrettiin hapen paineen funktiona, saadulla käyrällä oli minimi noin

150 baarin kohdalla (Benz & Stoltzfus 1986).

Kokeissa käytetyillä puristuspaineen nostamisnopeuksilla koekappale syttyi 25–100 s:n kuluttua puristuksen aloittamisesta. Syttymishetkellä hapen lämpötila 1,3 mm:n etäisyydellä oli 400–1200 °C (Schoenman, Stoltzfus & Kazaroff 1987).

Zhu ym. (1988) huomauttavat, että koekappaleiden kuumeneminen ja syttyminen riippuvat neljästä ilmiöstä:

1. Puristuksen aikaansaama kitkalämpö.
2. Koekappaleiden lämpöhäviöt konvektion ja johtumisen vaikutuksesta.
3. Koekappaleiden kuumeneminen metallin reagoidessa hapen kanssa.
4. Pinnoille kertyvän oksidikerroksen reaktioita hidastava vaikutus.

Puristuspaineen ja pyörityslaitteen vääntömomentin perusteella voitiin periaatteessa laskea koekappaleiden kitkakerroin. Pyöritysakselin vääntyminen aiheutti kuitenkin epävarmuustekijän laskeutuun kitkakertoimeen. Stoltzfus, Benz & Homa (1989) lisäsivät pyöritysakseliin venymäanturin, jonka avulla kitkakerroin voitiin määrittää aikaisempaan luotettavammin.

He toteavat, että suure P_v ja kitkakerroin riippuvat nopeudesta v eri tavoin. Sen sijaan jos suure P_v kerrotaan kitkakertoimella μ , saadaan nopeudesta v riippumaton suure, joka kuvaa paremmin tutkittavaa materiaalia kuin suure P_v . Esimerkiksi ruostumattomalla teräksellä AISI 304 suurelle $P_v\mu$ saatiin arvo 11,5 MPa·m/s. Tämä merkitsee siis, että suure P_v on kääntäen verrannollinen kitkakertoimeen μ .

Kuitenkin Stoltzfus, Benz & Homa (1989) toteavat, että metallien syttyminen kitkakuumennuksessa riippuu kahdesta ominaisuudesta:

1. Metallien kyvystä muuntaa mekaanista energiaa lämmöksi.
2. Lämpömäärästä, joka tarvitaan metallin kuumentamiseen syttymislämpötilaan.

Koska suure P_v mittaa molempia ominaisuuksia, sitä tulisi käyttää valittaessa materiaaleja niihin komponentteihin, joiden syttyminen kitkakuumennuksen vaikutuksesta on mahdollista. Sen sijaan, jos komponentti on sellainen, että se voi syttyä myös syttymisketjun vaikutuksesta, valinta voidaan tehdä suureen $P_v\mu$ perusteella. Tällä tavalla saadaan metalleille suunnilleen sama paremmuusjärjestys kuin syttymisketjua simuloivalla testillä.

Homa ja Stoltzfus (1993) ovat tutkineet metallipintojen kulumista hankauksessa. Koekappaleena oli 25 mm pitkä puikko, jonka halkaisija oli 8 mm. Puikon pää oli puolipallon muotoinen. Koe-laitteessa puikko puristettiin vasten pyörivää levyä, jonka halkaisija oli 51 mm ja paksuus 13 mm. Sekä puikon pää että levy kiillotettiin ennen koetta. Puikko ja levy olivat koekammiossa, jossa hapen paine oli 69 bar.

Kokeissa käytetyt metallit käyttäytyivät eri tavalla. Ruostumattomalla teräksellä AISI 440C (Fe 82 %, Cr 17 %, C 1 %) ja Inconel 718 -seoksella (Ni 52 %, Fe 19 %, Cr 18 %, Nb/Ta 5 %, Mo 3 %, Ti 1 %) havaittiin lievää tartuntakulumista, jonka vaikutuksesta levyn pinnalle muodostui sileä oksidikerros, sekä vähäistä yleistä kulumista. Inconel MA754 (Ni 78,7 %, Cr 19,6 %) sekä Monel K-500 (Ni 64,5 %, Cu 30,4 %, Al 3 %, Mn 0,7 %, Fe 0,6 %, Ti 0,5 %) -seoksilla havaittiin levyn pinnan kuoriutuvan kerroksittain, jolloin kulumaauraa säröili ja pinnasta irtosi hiutaleita. Puikon ta-

kaa irtosi koko ajan runsaasti palavia hiukkasia.

Tässä koelaitteessa puikko ja levy kuumenivat vain pieneltä alueelta. Metallin kuumetessa muodostuva oksidikerros ei tällöin ilmeisesti ole stabiili toisin kuin toisiaan vasten hankaavien putkien tapauksessa.

Bryan, Stoltzfus, & Cunaji (1991) selvittävät, miten Kennedyn avaruuskeskuksen happiputkistojen ehdotettu käyttöpaineen alentaminen 412 baarista 206 baariin vaikuttaa putkistopalojen todennäköisyyteen. He antavat suuren Pv arvoksi ruostumattomalle teräkselle AISI 304 82–119 MPa·m/s ja ruostumattomalle teräkselle AISI 316 75–86 MPa·m/s. Nämä tulokset on saatu hapen paineella 69 bar ja nopeudella $v = 20$ m/s.

Happiputkistojen komponenttien mahdollinen hankaus liittyy venttiilin lautasen, karan tai luistin liikkeeseen. Nämä liikkeet tapahtuvat suhteellisen pienellä nopeudella ja liikematka on lyhyt. Tästä Bryan, Stoltzfus, & Cunaji (1991) päättelivät, että hankauskitka ei aiheuta merkittävää venttiilin syttymisvaaraa kummallakaan hapen paineella. Sen sijaan käyttöpaineen alentaminen edellyttäisi hapen virtausnopeuden kasvattamista arvosta 30 m/s arvoon 50 m/s, mikä lisäisi hiukkasten törmäyksien aiheuttamien putkistopalojen riskiä.

Polymeereillä ei ole standardoitua kitkakuumnustestimenetelmää eikä tällaista tiettävästi ole kehitteillä. NASAn 1970-luvussa tekemissä alustavissa kokeissa todettiin, että polymeerejä on vaikea saada syttymään kitkakuumnuksella, ja siksi huomio suunnattiin metallien testaamiseen. Polymeerit (varsinkin nailon) sulivat ja valuivat pois hankausalueelta (ASTM G 63-99).

5.2 ADIABAATTINEN PURISTUS

Werley (1983) tekee yhteenvedon happiputkistoon muodostuneen öljykalvon syttymisvaarasta hapen kuumetessa adiabaattisen puristuksen vaikutuksesta. Ongelma on tunnettu kauan ja sen takia on annettu ohjearvoja turvallisen öljykalvon paksuudesta. Werley huomauttaa, että pelkkä öljykalvon paksuus (yksiköissä mg/m^2) ei riitä, vaan mm. seuraaviin seikkoihin on kiinnitettävä huomiota:

- onko öljy jakautunut tasaisesti putkistoon?
- onko öljy helposti vai vaikeasti syttyvää?
- minkä materiaalien kanssa öljy on kosketuksissa?
- kuinka paljon putkistossa on kaikkiaan öljyä?

Putkistossa oleva öljy voi aiheuttaa vaaraa monella tavalla:

1. Öljy voi syttyä ja levittää paloa.
2. Hapen virtaus voi irrottaa putken seinämästä öljysumua tai kuumeneva happi voi haihduttaa öljyä.
3. Öljykalvo voi helpottaa muiden materiaalien syttymistä, vaikka se olisi liian ohut syttymään.
4. Öljy voi kulkeutua putkistossa ja muodostaa jonnekin kalvon, joka on riittävän paksu syttyäkseen.

Pedley ym. (1987) ovat tutkineet eri paksuisten öljykalvojen syttymistä happiputkistossa. Koe-laitteisto rakennettiin ruostumattomasta teräksestä AISI 304 valmistetusta putkesta, jonka sisä-halkaisija oli 80 mm. Putkisto paineistettiin hapella 69–430 baarin paineeseen avaamalla nopea sulkuventtiili 0,1 s:n ajaksi. Ensimmäinen 0,6 m:n putki oli puhdistettu epäpuhtauksista. Toisen yhtä pitkän putken sisäpinnalla oli hiilivetytymäisen öljyn kalvo. Kalvon paksuus vaihteli 25–9000 mg/m².

Jokaisella öljykalvon paksuuden ja hapen paineen arvoyhdistelmällä tehtiin 10–30 koetta. Öljyn syttyminen havaittiin valokennon sekä molemmissa putkissa olevien paineantureiden avulla. Öljykalvon paksuudella 25 mg/m² öljy ei syttynyt yhdessäkään kokeessa. Vastaavasti paksuudella 3200 mg/m² sekä sitä suuremmilla paksuuksilla öljy syttyi kaikissa kokeissa. Näiden välisillä öljykalvon paksuuden arvoilla 65–540 mg/m² öljyn syttymistodennäköisyys (niiden kokeiden osuus, joissa öljy syttyi) kasvoi hapen paineen kasvaessa.

Kokeiden perusteella pääteltiin, että turvallinen öljykalvon paksuus on välillä 25–65 mg/m², joka on selvästi pienempi kuin aikaisemmissa kokeissa, joissa öljykalvoa on yritetty sytyttää hapen adiabaattisella kuumennuksella. Sen sijaan eräissä kokeissa, joissa öljykalvoa yritettiin sytyttää muulla tavalla, saatiin lähes yhtä pieniä kalvopaksumuksia.

Barthelemy ja Vagnard (1988) ovat tutkineet PTFE:llä pinnoitettujen letkujen syttymistä, kun ne paineistetaan nopeasti hapella. Letkujen pituus oli 1–3 m, sisähalkaisija 4–9 mm ja PTFE-sisäpinnoitteen paksuus 0,7–1 mm. Letkut oli ulkopuolelta palmikkopinnoitettu ruostumattomalla teräksellä.

Letkuja huuhdeltiin kolmesti 12 tunnin ajan pumppaamalla niiden läpi liuotetta nopeudella 0,5–2 m/s. Käytetty liuote haihdutettiin ja haihdutusjäännös analysoitiin. Haihdutusjäännös koostui öljyistä sekä pehmentimistä ja sen itsesyttymislämpötilaksi saatiin 160–220 °C. Epäpuhtauskerroksen paksuus vaihteli 1–84 g/m². Tämä oli yksi tai kaksi kertalukua suurempi kuin mitä happiletkuille sallittiin: 0,1 g/m² = 100 mg/m². Kokeita tehtiin sekä puhdistetuilla että puhdistamattomilla letkuilla.

Letkut paineistettiin 20 s:n ajaksi 240 baarin paineeseen. Venttiilin avautumisaika oli 10–20 ms, mutta letkun paineistuminen kesti virtaushäviöiden vuoksi huomattavasti kauemmin. Tämän jälkeen paine alennettiin 10 s:ssa ulkoiseen paineeseen. Jos letku ei syttynyt, se paineistettiin samalla tavalla vielä enintään 19 kertaa. Letkun vauriokohta sijaitsi joko suljetussa päässä tai jonkin matkan päässä siitä. Vauriokohdassa saattoi olla vain pieni reikä, letku saattoi katketa tai jopa osittain tuhoutua.

Letkujen sisäpinnan tarkastus osoitti, että PTFE oli kaikissa tapauksissa syttynyt lähellä suljettua päätä. Tämän selitettiin johtuvan siitä, että palo alkoi hapen adiabaattisen puristuksen eniten kuumenemasta kohdasta. Letkun katkeaminen jonkin matkan päässä letkun päästä selitettiin olevan seurausta PTFE:n huonosta lämmönjohtavuudesta, minkä takia palo eteni letkun sisäpinnalla nopeammin kuin PTFE-kerroksen läpi. Puhdistetut ja likaiset letkut paloivat samalla tavalla.

Kokeiden perusteella Barthelemy ja Vagnard (1988) suosittelevat metalliputken sijoittamista letkun ja sen liittimen väliin. Jos putki valmistetaan ruostumattomasta teräksestä, sen tulisi olla 250 mm pitkä. Tällainen putki tehostaa lämmön siirtymistä pois kuumenneesta hapesta ja estää PTFE:n syttymisen.

Janoff ym. (1989) ovat testanneet PTFE-pinnoitettuja happiletkuja paineistamalla ne 14 ms:ssa 414 baarin paineeseen. Letkujen sisähalkaisija oli 10 mm ja pituus 150 tai 460 mm. Pinnoitteen mahdollista syttymistä ja palamista seurattiin infrapunavideokuvauksella. Jos letkun sisäpinnan lämpötila nousi, letku pidettiin paineistettuna kunnes sisäpinta oli jäähtynyt tai letku revennyt.

Letkut eivät kuumenneet kun ne paineistettiin 35 baariin. Seuraavalla paineella 69 bar letkut kuumenivat, mutta eivät palaneet puhki eivätkä revenneet. 103 baarin paineella letkut paloivat puhki noin 100 s:n kuluttua alkupään läheltä. 207 baarin paineella letkut paloivat puhki samasta kohdasta 5–10 s:n kuluttua. Videot osoittivat, että letkun sisäpinnan kuumeneminen alkoi aina suljetusta loppupäästä. Kuumat kohdat etenivät kohti letkun alkupäätä kunnes letku paloi puhki joko loppu- tai alkupäänsä lähellä.

Kun paine oli 414 bar ja paineistamisaikaa pidennettiin 0,1–0,2 s:iin, letkut paloivat puhki noin 2 sekunnissa. Tätä pitemmillä paineistamisajoilla (0,4–1 s) letkut eivät syttyneet.

5.3 MEKAANINEN ISKU

Metallien syttyminen mekaanisesta iskusta on paljon epätodennäköisempää kuin epämetallien syttyminen. Tiedetyt metallit, kuten alumiini, magnesium, titaani ja zirkonium, ovat joskus syttyneet iskusta. Epämetallien syttyminen iskusta on todennäköisempää ja niiden syttymisherkkyuden luokitteluun käytetään standardin ASTM G 86 mukaista testiä. Testissä 9,1 kg:n paino pudotetaan vastakappaleen päälle, joka välittää iskun koekappaleeseen iskevään iskuripuikkoon. Suurin pudotuskorkeus on 1,1 m ja vastaava potentiaalienergia 98 J (ASTM G 94-92).

Bryan ym. (2000) ovat tutkineet 13 polymeerin syttymistä tässä testissä. Hapen pitoisuutta ja kaasuseoksen painetta vaihdeltiin. Tarkoituksena oli määrittää toisaalta pienin happipitoisuus, jolla koekappale saadaan syttymään suurimmalla energialla ja korkeimmalla paineella (345 bar), ja toisaalta pienin energia, jolla koekappale saadaan syttymään tietyllä happipitoisuudella ja paineella. PTFE:tä ei saatu syttymään edes puhtaassa hapessa missään paineessa eikä suurimmallakaan energialla.

5.4 HIUKKASTEN TÖRMÄYS

Wegener (1964) tutki, voidaanko hapen virtausnopeutta putkistoissa kasvattaa Saksassa turvallisena pidetystä arvosta 8 m/s. Koelaitteistona oli putkisto, jonka läpi puhallettiin happea. Hapen paine oli noin 30 bar. Alussa oli 66 m pitkä putki, jonka halkaisija oli 150 mm. Hapen virtausta säädeltiin tähän putkeen sijoitetulla kuristuslaipalla. Seuraavana oli teräksinen 40 m pitkä ja halkaisijaltaan 40 mm:n suora putki. Toisissa kokeissa tämän putken keskikohtaan liitettiin hitsaamalla joko kahdesta tai neljästä 90°:n käyrästä koottu putki. Hapen virtausnopeutta 40 mm:n putkessa ei mitattu, koska paineiskujen pelättiin voivan vahingoittaa mittausantureita. Sen sijaan nopeus putken alku- ja loppupäässä laskettiin paineen ja lämpötilan mittausarvojen perusteella.

Tuloputken sulkuventtiili avattiin ja odotettiin, että virtaus saavutti tasapainon. Sitten avattiin sivuhaaran venttiili, jolloin happi pääsi virtaamaan sivuhaarassa olevan 3 dm³:n hiukkassäiliön kautta. Säiliössä oli 1–2 kg tutkittavia hiukkasia ja se tyhjeni 30–60 s:ssa. Kokeissa käytettiin sellaisia hiukkasia, joita happiputkistoihin voi olettaa kertyvän valmistuksen, muutostöiden ja käytön yhteydessä: valssaushilsettä, hitsauskuonaa ja ruostetta. Lisäksi säiliöiden hiekkapuhalluksen yhteydessä putkistoihin voi päästä hiekkaa. Vertailun vuoksi kokeita tehtiin myös masuuni-, koksija kivihiilipölyllä sekä hiekan ja rautapölyn seoksella. Osa hiukkasista oli jauhetta ja osa rakeita

(raekoko enintään 5 mm).

Osassa kokeita hiukkaset syttyivät ja joissakin kokeissa myös putki syttyi palamaan. Seuraavassa on Wegenerin (1964) taulukoista poimittu pienimmät nopeudet, joilla hiukkaset syttyivät, tai suurimmat nopeudet, joilla hiukkaset eivät vielä syttyneet. Kaikissa tapauksissa on annettu hapen virtausnopeus putken alku- ja loppupäässä.

- *Ruoste, masuunipöly, hiekka.* Nopeus alussa 53 m/s, lopussa 84 m/s: ei syttynyt.
- *Valssaushilse.* Suora putki, nopeus alussa 51 m/s, lopussa 84 m/s: ei syttynyt. Mukana käyriä, nopeus alussa 30 m/s, lopussa 33 m/s: hiukkaset syttyivät osassa kokeita. Nopeus alussa 52 m/s, lopussa 82 m/s: putki syttyi.
- *Hitsauskuona.* Suora putki, nopeus alussa 44 m/s, lopussa 57 m/s: hiukkaset syttyivät. Mukana käyriä, nopeus alussa 17 m/s, lopussa 18 m/s: hiukkaset syttyivät. Nopeus alussa 53 m/s, lopussa 84 m/s: putki ei syttynyt.
- *Koksi.* Suora putki, nopeus alussa 30 m/s, lopussa 35 m/s: hiukkaset syttyivät. Mukana käyriä, nopeus alussa 17 m/s, lopussa 18 m/s: hiukkaset syttyivät. Nopeus alussa 53 m/s, lopussa 84 m/s: putki syttyi.
- *Kivihiihi.* Suora putki, nopeus alussa ja lopussa 13 m/s: hiukkaset syttyivät. Mukana käyriä, nopeus alussa ja lopussa 13 m/s: putki syttyi.
- *80 % hiekkaa, 20 % rautaa.* Mukana käyriä, nopeus alussa ja lopussa 13 m/s: hiukkaset syttyivät. Nopeus alussa 28 m/s ja lopussa 31 m/s: putki syttyi.

Wegener (1964) päättelee, että happivirtauksen kuljettamat metallihiukkaset voivat syttyä, jos niissä (kuten valssaushilseessä tai hitsauskuonassa) on mukana hapettumatonta metallia ja niiden nopeus on tarpeeksi suuri. Tutkimuksessa ei kuitenkaan mitattu hiukkasten nopeuksia eikä selvitetty, millä matkalla nopeudet saavuttavat happivirtauksen nopeuden. Toisaalta virtaus on turbulентinen ja hiukkasten nopeudella on myös poikittaiset komponenttinsa. Näistä syistä johtuen hiukkasten ja putken syttymiseen johtavia törmäysnopeuksia oli vaikea arvioida.

Williams, Benz ja McIlroy (1988) ovat tutkineet teräslevyjen syttymistä hapessa, kun niihin törmää rautahiukkasia. Kokeissa käytettiin rautahiukkasia, joiden halkaisija oli 50–150 µm, sekä hiekanjyviä, joiden halkaisija oli 150–800 µm.

Happivirtauksen nopeutta säädeltiin kuristuslevyllä 15–61 m/s. Virtaukseen sekoitettiin hiukkasseos, jossa oli 2 g rautahiukkasia ja 3 g hiekanjyviä. Hiukkassuihku kohdistettiin keskelle pyöreää teräslevyä, jonka reunalla oli rivi aukkoja happivirtausta varten. Teräslevy oli valmistettu hiiliteräksestä, ruostumattomasta teräksestä AISI 316 tai ruostumattomasta teräksestä AISI 304. Syttyminen havaittiin liekin ja levyn ilmeisten palojälkien perusteella.

Hiiliteräksellä tehtiin 100 koetta hiukkasten keskinopeudella 15,6 m/s sekä kaksi koetta nopeuksilla 24, 31 ja 51 m/s. Levy syttyi palamaan molemmissa kokeissa, jotka tehtiin nopeudella 51 m/s, mutta ei muissa kokeissa.

Ruostumattomalla teräksellä AISI 316 tehtiin 43 koetta nopeuksilla 13–38 m/s, kaksi koetta nopeudella 51 m/s ja yksi koe nopeudella 54 m/s. Levy syttyi palamaan yhdessä nopeudelle 51 m/s tehdyssä kokeista sekä nopeudella 54 m/s tehdyssä kokeessa. Pienemmillä nopeuksilla tehdyissä kokeissa levy ei syttynyt.

Ruostumattomalla teräksellä AISI 304 tehtiin 23 koetta nopeuksilla 20–45 m/s, joista yhdessä-

kään levy ei syttynyt. Tällä materiaalilla oli tarkoitus jatkaa kokeita käyttäen suurempia hiukkasten nopeuksia.

Kaikissa tapauksissa levyn syttymisen edellytyksenä oli siihen törmänneiden rautahiukkasten syttyminen. Hiukkasten syttymisen varmistettiin käyttämällä kohteena Incoloy 825 –ruostumatonta terästä. Tämä materiaali ei syttynyt, kun hiukkasten keskinopeus oli 51 m/s. Hiukkasten syttymisen kuitenkin sekä havaittiin valokennolla että todettiin kohdelevyn roiskejäljistä. Yhdessäkään kokeessa, joissa levy ei syttynyt, koekammioista poistuvassa kaasuvirtauksessa ei havaittu palavia hiukkasia.

Kokeista pääteltiin, että suurin turvallinen hapen virtausnopeus on 45 m/s. Tällöin hiukkaset eivät syty palamaan törmätessään pintoihin. Aikaisemmasta käsityksestä poiketen turvallinen virtausnopeus ei riippunut hapen paineesta, joka Williamsin, Benzin ja McIlroyn (1988) kokeissa vaihteli 40–300 bar.

Benz, Williams ja Armstrong (1986) tekivät kokeita, joissa halkaisijaltaan 1,6 ja 2,0 mm:n kuulia kiihdytettiin äänen nopeutta suuremmalla nopeudella virtaavalla hapella. Törmäysnopeudet arvioitiin kuparikohtioon syntyneen iskujäljen syvyyden perusteella. Kuulat oli valmistettu alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä AISI 304. Alumiinikuulien törmäysnopeus oli noin 50 % ja teräskuulien noin 35 % happivirtauksen nopeudesta, kun kuulien halkaisija oli 1,6 mm. Kohtiot olivat kupin muotoisia ja niiden halkaisija oli 9,5 mm ja paksuus 1,6 mm. Hapen painetta ja lämpötilaa vaihdeltiin.

Kun ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistettuun kohtioon törmäsi yksi halkaisijaltaan 1,6 mm:n alumiinikuula, kohtio syttyi, kun hapen lämpötila oli vähintään 207 °C. Kun kuulan säde kasvatettiin 2,0 mm:iin, kohtio syttyi jopa 107 °C:n lämpötilassa. Kun kokeessa käytettiin ruostumattomasta teräksestä AISI 304 valmistettua kuulaa, jonka halkaisija oli 1,6 mm, kohtio syttyi vasta 330 °C:n lämpötilassa. Syttymislämpötilan vaihtelu johtui kuulien liike-energian ja palamislämmön eroista. Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää metallien testausmenetelmä eikä sen tuloksia voi helposti yleistää hiukkasten törmäyksille.

Dees ym. (1995) tekivät vastaavia kokeita, joissa hiukkaset oli valmistettu neljästä happiputkistoissa yleisesti käytetystä polymeerimateriaalista, mm. PTFE:stä. Pienemmät hiukkaset, joiden halkaisija oli noin 250 µm, ammuttiin yksitellen tai viiden ryhmässä päin levyä. Suuremmat hiukkaset, joiden halkaisija oli 1 mm tai 2 mm, laukaistiin yksitellen. Sekä äänen nopeutta pienempiä että suurempia nopeuksia käytettiin. Hapen paine oli 276 bar ja lämpötila 21–93 °C. Yhdessäkään kokeessa ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistettu levy ei syttynyt.

Forsyth, Gallus ja Stoltzfus (2000) ovat tutkineet polymeerikohtioiden syttymistä hapessa, kun niihin törmää halkaisijaltaan 2,0 mm:n alumiinikuulia. Kaikissa kokeissa happi virtasi äänen nopeutta suuremmalla nopeudella. Hapen paine vaihteli 69–275 bar ja lämpötila 10–205 °C. Tarkoituksena oli mitata alin lämpötila, jossa kohtio syttyy törmäyksestä. Kohtiot oli valmistettu PTFE:stä sekä kolmesta muusta happiputkistoissa käytettävästä polymeeristä.

PTFE:llä ongelmia tuotti kohtion hajoaminen hapen virtauksen vaikutuksesta. Kuppimaista kohtiota voitiin käyttää vain pienimmällä paineella 69 bar. Suuremmilla paineilla (138–275 bar) käytettiin levymäistä kohtiota. Silti joissakin kokeissa kohtio repesi happivirrassa sen jälkeen, kun kuulat (2–3 kuulaa/koe) olivat osuneet siihen. Toisissa kokeissa kuulat upposivat kohtioon. Onnistuneita kokeita oli yhteensä 32 eikä kohtio syttynyt yhdessäkään kokeessa. Sen sijaan polyet-

terieetteriketonista valmistetut kohtiot syttyivät 275 baarin paineessa ja -5°C :n lämpötilassa. Polyimidilla vastaava alin lämpötila oli 120°C .

5.5 STAATTINEN SÄHKÖ

Frohberg ym. (1978) ovat tutkineet staattisen varausten syntymistä terästehtaan happiputkistoissa. Tutkimuksessa rakennettiin koelaitteisto 40 mm:n putkesta. Putkimateriaalina käytettiin vaihtoehtoisesti seostamatonta terästä, kuparia ja messinkiä. Hapen virtausnopeus putkessa oli 30–150 m/s. Hapteen sekoitettiin ruoste- ja pajahilsehiukkasia sekä hiekanjyviä.

Hiukkaset varautuivat negatiivisesti. Keskimääräinen varaus oli $6\text{ }\mu\text{C/g}$. Kipinän syntyminen on mahdollista vain, jos happiputkessa on siitä sähköisesti eristetty, metallinen komponentti. Tällaista komponenttia ei pitäisi happiputkistossa olla, mikäli määryksiä noudatetaan.

Koelaitteistoon sijoitettiin kuitenkin eristetty rengaslevy. Suurin potentiaaliero, joka levyyn pystytettiin muodostamaan, oli 16 kV. Tämä on 4–6-kertainen todellisissa putkissa mahdollisiin potentiaalieroihin verrattuna. Lisäksi putkistoissa mahdollisesti olevan pölyn pitoisuus on useita kertaluokua syttymisrajaa pienempi. Tämä osoittaa, että staattinen varautuminen on mahdollista, mutta kun otetaan huomioon kaasun kuljettamien hiukkasten luonne ja pitoisuus sekä putkivarusteiden yhteys toisiinsa, niin varauksen purkautuminen ei pysty sytyttämään putkea palamaan.

Käytännön kokemus happiputkistoista on osoittanut, että epämetallien syttyminen staattisen sähkönsä kipinästä on epätodennäköistä (ASTM G63-99).

5.6 VALOKAARI

Epämetallien syttymiselle valokaaren vaikutuksesta ei ole kehitetty eikä ole tarkoitus kehittää testausmenetelmää. Lisäksi NASAn happijärjestelmissä sattuneiden vahinkojen tutkimus viittaa siihen, että valokaari ei ole johtanut epämetallien syttymiseen korkeapaineisessa hapessakaan (ASTM G63-99).

5.7 SYTTYMISKETJU

McIlroy, Zawierucha ja Drnevich (1988) ovat tutkineet yli 40 metalliseoksen syttymistä puristuksessa hapessa. Koekappaleena oli 100 mm pitkä puikko, jonka halkaisija oli 3,2 mm. Puikko oli sijoitettu pystysuoraan koekammioon. Puikon alapää oli upokkaassa, jonka pohjalla oli 0,5 g öljyä. Öljy sytytettiin sähkökipinällä. Osassa kokeista lisäsytyttimenä käytettiin 0,5 mm:n rautalankaa, jonka alapää oli upotettu öljyyn ja joka oli kiedottu puikon alapään ympärille. Koska rautalangan palamislämpötila oli jopa 3000°C , se kuumensi koekappaletta voimakkaasti pieneltä alueelta.

Hiiliteräspuikko saatiin syttymään öljyllä hapen paineissa 69–331 bar. Sen sijaan ruostumattomat teräkset (mm. AISI 304 ja AISI 316) eivät syttyneet edes hapen paineessa 345 bar. Käyttämällä lisäsytytintä saatiin ruostumattomat teräkset palamaan. Painealueella 69–110 bar useiden ruostumattomien terästen (mm. AISI 304 ja AISI 316) koekappaleet paloivat kokonaan. Näillä paineilla palo eteni koekappaleessa ylöspäin nopeudella 9 mm/s.

Janoff ja Pedley (1997) toteavat, että 3,2 mm:n puikolla tehtyjen testien perusteella määritellyt kynnyspaineet ovat olleet perustana luokiteltaessa metalliseoksia sen nojalla, kuinka helposti ne syttyvät hapessa. Kynnyspaine (threshold pressure) on määritelty pienimmäksi hapen paineeksi, jossa sytyttimellä sytytetty puikko palaa kokonaisuudessaan.

Vaikka kynnyspaine soveltuukin luokitteluun, sitä ei yleensä voi hyödyntää happijärjestelmien komponenttien suunnittelussa. Tämä koskee erityisesti komponentteja, joiden pinta-alan suhde tilavuuteen on suurempi kuin 3,2 mm:n puikolla.

Ruostumattomien terästen AISI 304 ja 316 kynnyspaineeksi saatiin 3,2 mm:n puikoilla 34,5 bar. Kun puikon halkaisija kasvatettiin 6,4 mm:iin, kynnyspaine nousi 69 baariin. Sen sijaan ruostumattomista teräksistä AISI 304 ja 316 valmistetut putket, joiden ulkohalkaisija oli 8 mm ja sisähalkaisija 6 mm, syttyivät ilmakehän paineessa.

Myös ruostumattoman teräksen AISI 316 verkosta (langan paksuus 0,2 mm) tehty rulla syttyi ilmakehän paineessa. Ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistetulle levyille (150 mm x 13 mm), jonka paksuus oli 3 mm, saatiin sama kynnyspaine (34,5 bar) kuin 3,2 mm:n puikolle. Sen sijaan ohuemmalle levyille, jonka paksuus oli 0,8 mm, saatiin kynnyspaineeksi 345 bar.

Metallipuikko palaa sen alapäähän muodostuvassa sulan metallin pisarassa. Jonkin ajan kuluttua pisara putoaa ja uusi alkaa muodostua. Puikon halkaisija vaikuttaa pisaran kokoon ja lämmön johtumiseen pisarasta puikkoon. Säteilylämmönsiirto pisarasta puikkoon on kuitenkin vähäistä. Sen sijaan toisenlaisilla metallikappaleilla säteilylämmönsiirto voi olla merkittävää. Esimerkiksi palavan putken pään lämpösäteily kuumentaa putken sisäpintaa.

Werley ja Hansel (1997) tekevät yhteenvedon ruostumattomien terästen AISI 304, 308 ja 316 kynnyspaineen arvoon vaikuttavista tekijöistä:

- kynnyspaine laskee, kun sytyttimen energia kasvaa
- kynnyspaine nousee, kun puikon halkaisija kasvaa
- kynnyspaine nousee, kun putken seinämän paksuus kasvaa
- putken kynnyspaine on samaa luokkaa kuin puikon, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin putken seinämän paksuus
- pintakäsittely vaikuttaa vain vähän kynnyspaineeseen
- hehkutus vaikuttaa vain vähän kynnyspaineeseen
- hapen virtaus putken lävitse laskee kynnyspainetta.

Myös De Wit, Steinberg ja Haas (2000) tarkastelevat koekappaleen muodon ja mittojen vaikutusta kynnyspaineeseen. Ruostumattomalla teräksellä AISI 316 kynnyspaine riippuu puikon halkaisijasta seuraavasti: 34,5 bar (3,2 mm), 172 bar (6,4 mm) ja 138 bar (12,7 mm). Vaikka kaikkia kokeita ei oltu vielä tehty (6,4 mm:n halkaisijalla oli tehty vasta viisi koetta), näytti siltä, että kynnyspaine kasvaa puikon halkaisijan kasvaessa.

Shelley, Wilson ja Beeson (1997) ovat tutkineet neljän polymeerin (mm. HD-polyeteenin ja PTFE:n) kykyä sytyttää metallipuikko puristetussa hapessa. Polymeerien koekappaleet olivat lieperiöitä, joiden halkaisija oli 13 mm ja korkeus 6,4 mm. Metallipuikot (halkaisija 3,2 mm pituus 152 mm) oli valmistettu alumiinista, kuparista ja ruostumattomasta teräksestä AISI 316. Metallipuikot oli sijoitettu pystyyn polymeerilieriön päälle. Lieriöt sytytettiin niiden vaipan uraan upotetulla sytytyslangalla.

HD-polyeteeni paloi diffuusioliellä, joka oli irti lieriön pinnasta. PTFE sen sijaan paloi pinnaltaan hehkupalona. HD-polyeteeni sytytti ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistetun puikon palamaan osassa kokeita, kun hapen paine oli 69–690 bar. PTFE ei sen sijaan sytyttänyt puikkoa yhdessäkään kokeessa.

Tämän selitettiin johtuvan siitä, että HD-polyeteenin diffuusioliikki kosketti puikon alaosan pintaa. Lämmönsiirto liekistä metalliin tapahtui säteilyn ja kuumien kaasujen konvektion avulla. Sen sijaan lämmönsiirto PTFE:n pinnasta metalliin tapahtui johtumalla ja hapen konvektion vaikutuksesta, mitkä ovat paljon tehottomampia lämmönsiirtymisilmiöitä.

Air Liquide on käyttänyt toisenlaista testausmenetelmää happiputkistojen metallien valinnassa. Testauslaitteena käytettiin metrin pituista, halkaisijaltaan 80 mm:n putkea, jonka seinämän vahvuus vaihteli 3–12,5 mm. Kokeita tehtiin myös halkaisijaltaan 200 mm:n putkella. Putki paineistettiin jopa 100 baarin paineeseen hapella tai hapen ja typen seoksella. Hapen pitoisuus vaihteli 60–99,7 % ja lämpötila oli enintään 300 °C. Korkeampia lämpötiloja ei voitu käyttää, koska niissä rautajauhe syttyi itsestään. Kaasu virtasi jatkuvasti putken läpi nopeudella 5 cm/s. Sytyttimenä käytettiin teräskuppia, joka keskellä oleva polymeerikapseli sytytettiin vastuslangalla kuumentamalla. Lisäsytyttimenä kupissa oli rautajauhetta. Kokeen aikana seurattiin kaasun painetta ja lämpötilaa sekä putken ulkopinnan lämpötilaa. Kun putken seinämän havaittiin murtuvan, hapen virtaus katkaistiin.

Mittaustuloksista määritettiin rautajauheen määrä, joka 50 %:ssa tapauksista riittää putken läpialamiseen. Lisäksi määritettiin putken seinämän murtumiseen kuluva aika. Vertailumetallina käytettiin kuparia, jolla oli suurin murtumiseen tarvittava rautajauheen määrä ja pisin seinämän murtumiseen kuluva aika. Muiden metallien vastaavat suureet jaettiin kuparin suureilla ja saaduista prosenttiluvuista otettiin keskiarvo. Esimerkiksi ruostumattomalle teräkselle AISI 304L saatiin keskiarvoksi 55 % ja hiiliteräkselle 40 %. Mitä pienempi keskiarvo on, sitä helpommin metalli syttyy.

Toisissa kokeissa hapen syöttöä jatkettiin seinämän murtumisen jälkeen niin kauan, kunnes palo sammui. Näissä kokeissa määritettiin seinämästä hävinneen metallin tilavuus. Vertailumetallina käytettiin jälleen kuparia, jolla mitattiin pienin hävinneen metallin tilavuus. Kun tilavuus kerrottiin metallin energiatihedellä (palamislämpö $\times$ tiheys), saatiin putkipalossa vapautuva metallin palamisenergia. Kun tulos jaettiin kuparin vastaavalla luvulla, saatiin metallipalojen etenemistä kuvaava vertailuluku. Esimerkiksi ruostumattomalle teräkselle AISI 304L saatiin vertailuluvuksi 3,5 ja hiiliteräkselle 19. Mitä suurempi vertailuluku on, sitä enemmän energiaa metallipalossa vapautuu (Diegues ym. 1988).

Fano, Faupin ja Barthelemy (2000) esittelevät menetelmiä, joita Air Liquide on käyttänyt hapen siirtoputkien venttiilimateriaalien valinnassa. Hapen siirtoputkien pituus vaihtelee 1–500 km. Hapen paine oli ennen 1980-lukua käyttöön otetuilla putkilla 40 bar ja uudemmilla 64 bar tai 100 bar. Ensimmäisen käyttövuoden aikana sattuneista putkistopaloista saatu kokemus osoitti, että

- putkistoissa on aina hiukkasia
- virtausnopeuden vaihtelut tyhjentävät silloin tällöin pölyloukut
- hiukkasten törmäysten on arvioitu sytyttäneen 90 % putkistopaloista
- hiukkaset syttyvät palamaan (rautajauheen itsesytytmislämpötila hapessa on noin 325 °C) ja sytyttävät tiivisteen tai ohuen metalliosan, joka puolestaan sytyttää paksun metalliosan
- kriittisiä kohtia ovat venttiilit, joiden suunnitteluun ja materiaalivalintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota.

He huomauttavat, että Air Liquiden testausmenetelmä simuloi hyvin venttiilirungon läpipalamisen edellytyksiä. Menetelmä kuvaa hyvin syttymisketjua, jossa syttymislähteenä on hiukkasten törmäys. Seinämän murtumiseen tarvittavan rautajauheen määrä kuvaa palon syttymistodennäköisyyttä ja seinämästä hävinneen metallin tilavuus kuvaa putkistopalon vaurioita. Menetelmään ei liity erilaisesta geometriasta johtuvia tulkintaongelmia niin kuin ASTM:n testausmenetelmään.

Polymeerien kykyä sytyttää toisia polymeerejä tai pienintä tähän vaadittavaa ainemäärää ei ole nähty tarpeelliseksi tutkia, koska useimpien polymeerien palamislämpötilat ovat huomattavasti korkeampia kuin käytännöllisesti katsoen kaikkien polymeerien itsesyttymislämpötilat (ASTM 63-99).

Syttymisketjujen tunnistamista vaikeuttavat joskus ns. puuttuvat osat. Putkistoa tutkittaessa havaitaan toisinaan joidenkin osien puuttuvan, mikä saa epäilemään, että näitä osia ei ole asennettu. Toisinaan ei havaita minkäänlaisia palovaurioita. Kysymys on kuitenkin täydellisestä palamisesta: polymeeri palaa hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi (ja mahdollisesti muiksi kaasuiksi). Jos komponentin massa tai palamislämpö ovat pieniä, muihin osiin ei synny palovaurioita. Esimerkiksi palloventtiilien PTFE:stä valmistetut istukkatiivisteet (pieni palamislämpö) tai pulloventtiilien nailoniset istukkatiivisteet (pieni massa) ovat joissain tapauksissa palaneet täydellisesti siten, että metalliosissa ei ole havaittu minkäänlaisia vaurioita (ASTM G 145-96).

6 SATTUNEITA ONNETTOMUUKSIA

Tietokannoista Aerospace, COMPENDEX, EAD, Energy, HSELINE, INSPEC, METADEX, MHIDAS, NASA ja Pascal sekä Internetistä suoritettu tiedonhaku tuotti vain kolme kuvausta suuriläpimittaisen happilinjän venttiilipalosta, jotka kaikki (ilmeisesti) ovat sattuneet USA:ssa. Yksi onnettomuus sattui neste- ja kaksi kaasuventtiilillä. Lähteissä on myös käytännön kokemuksia tällaisten onnettomuuksien tutkinnasta.

Kaasupulloihin liitetyt pieniläpimittaiset putkistot ovat paljon yleisempiä kuin suuriläpimittaiset ja niillä sattuneiden onnettomuuksien tutkintaa on kuvattu useassakin lähteessä.

6.1 VAROVENTTIILIN PALO

Marshallin avaruuslentokeskuksen koekäyttöpenkin nestehappijärjestelmän varoventtiili syttyi palamaan elokuussa 1992. Operointivirheen seurauksena järjestelmän paine nousi avautumispaineeseen 379 bar. Ilmeisesti varoventtiili avautui ja sulkeutui jaksollisesti, kunnes lautasen hankauskitka sytytti venttiilin ruostumattomasta teräksestä AISI A286 valmistetun sisäpinnan palamaan.

Sytyttyään sisäpinta paloi helposti kuluttaen ruostumattomasta teräksestä AISI 316L valmistettua venttiilin runkoa kunnes runko repesi toiselta puoleltaan. Purkautuva kaasu väänsi pystysuorassa ollutta varoventtiilin nousuputkea 20°. Putken alapuolella ollut nestehapen puhallusputki paloi osittain ja sitä seuraava 90°:n käyrä kokonaan. Virtaussuunnassa seuraava T-kappale reikiintyi. Putken kappaleet siirsivät paikoiltaan kaapelirasian ja kaapeleita ja putosivat 8 metrin etäisyydelle. Kaksi työntekijää sai 1. ja 2. asteen palovammoja (Stoltzfus & Lowery 1995).

6.2 LÄPPÄVENTTIILIN PALO

Teollisuuden happijärjestelmän uuden ilmanpoistoyksikön 305 mm:n läppäventtiili paloi käyttöön-
oton loppuvaiheessa. Venttiilin runko, pidätinrenkas ja läppä oli valmistettu Hastalloy C -me-
talliseoksesta. Istukkatiiviste oli valmistettu polyklooritrifluorieteenistä (PCTFE), tukirengas Vi-
tonista (fluorattujen hiilivetyjen sekapolymeeri), laakeri lasikuituvahvisteisesta PTFE:stä sekä kara
ja sokka Inconel 718 -metalliseoksesta.

Ilmanpoistoyksikön kompressorit olivat käyneet useita tunteja puristaen ensin ilmaa ja sitten ha-
pen ja ilman seosta. Koko tämän ajan läppäventtiili oli ollut kiinni. Aikaisemmasta kokemuksesta
pääteltiin, että putkistossa venttiilin takana oli pieni inerttikaasun paine. Kaasuseosta kierrätettiin
järjestelmässä kunnes sen happipitoisuus oli saavuttanut tasapainoarvonsa. Sen jälkeen, kun hap-
pipitoisuus oli saavuttanut hyväksyttävän minimiarvonsa 99,6 %, kierrätystä jatkettiin vielä 1,5–2
tunnin ajan.

Tämän jälkeen läppäventtiili avattiin valvomosta käsin. Venttiili syttyi palamaan heti, kun sen läp-
pä raottui ja rakoon syntyi kuristettu virtaus. Palo levisi putken sisällä vaurioittaen seuraavana
putkessa ollutta vastaventtiiliä sekä 100–200 m pitkää putkijaksoa. Vastaventtiilin osa puhkaisi
seuraavan putkikäyrän ja kaatoi tukipylvään. Useat putkilinjan mutkat paloivat puhki liekkien, su-
lan metallin ja kuumien palamistuotteiden vaikutuksesta.

Venttiilin vaurioiden perusteella teräksen syttymisellä pääteltiin olevan kaksi todennäköistä al-
kusyytä:

1. Hiiliteräksestä valmistetun laipan syttyminen hiukkasten törmäyksestä.
2. Venttiilin tulopuolelle muodostunut syttymisketju.

Ensimmäistä selitystä tuki se, että happi virtaa suurella nopeudella tulopuolen hiiliteräslaipan luo-
na venttiilin läpän avautuessa. Koska läpän suurimmat vauriot olivat tulopuolelle avautuvassa
osassa, tälle alueelle muodostunutta syttymisketjua pidettiin tärkeänä. Kun läppä oli avautunut
10–20°, hiukkasten törmääminen tälle alueelle ei ollut merkittävää, koska läppä oli yhä kosketuk-
sessa istukkatiivisteen kanssa ja virtausnopeudet olivat pieniä. Läpän vaurioiden perusteella voitiin
laipan syttyminen hiukkasten törmäyksistä sulkea pois ja keskittyä syttymisketjun tunnistamiseen.

Kokemuksen mukaan venttiilin ja putkiston vauriot syntyvät syttymiskohdan alapuolelle hapen
virtaussuunnassa. Kitkaholkin materiaalit analysoitiin kemiallisesti. Osoittautui, että yksi materi-
aaleista oli fenolipohjainen. Fenolipolymeereja käytetään yleisesti holkkien rakenneaineena ja nii-
den itsesyttymislämpötila on luokkaa 155 °C, joka oli lähellä prosessin 132 °C:n lämpötilaa.

Vähäinen kitkalämpö venttiiliä avattaessa riitti kuumentamaan holkin sidosaineena käytetyn feno-
lipolymeerin syttymislämpötilaansa. Kuitenkin sidosaineen määrä tuskin riitti sytyttämään Inconel
718 -metallista valmistettua venttiilikaraa tai viereistä hiiliteräslaippaa. Syttymisketjun seuraava
lenkki oli todennäköisesti PCTFE-istukan ja Viton-tukirenkaan syttyminen erityisesti karan lä-
hiympäristössä, missä virtausnopeudet olivat pieniä. Istukan ja tukirenkaan palamisesta syntynyt
lämpö puolestaan riitti sytyttämään laipan ja karan (Newton & Forsyth 2003).

6.3 PALLOVENTTIILIN PALO

Heinäkuussa 2001 syttyi teollisuuslaitoksen happilinjän sulkuventtiilinä käytetty 152 mm:n pallo-

venttiili palamaan. Venttiilin sulkuelimenä oli yhdistetty kara ja pallo, joka tukeutui vähäkitkaiseen PTFE-fenoli-tiivistepintaan. Toissijaisena tiivistemateriaalina oli Buna-N. Venttiilin kaikki osat oli valmistettu hiiliteräksestä. Kara, pallo ja metalli-istukka oli niklattu. Venttiilissä oli kaksi voitelunippaa. Voiteluaine oli hiilivetypohjainen. Venttiili avattiin ja suljettiin kiertämällä käsipyörää 11 kierrosta. Tällöin sulkuelin kiertyi 90°.

Juuri ennen onnettomuutta venttiilille oli tehty tiiveystarkastus sulkemalla se ja laskemalla menopuolen hapen painetta 38 baarista 35 baariin. Tiiveystarkastuksen aikana paine-ero venttiilin yli oli siis noin 3 baaria. Tämän jälkeen venttiilin avaaminen aloitettiin käsipyörää kääntämällä. Tällöin venttiilin sisällä syttyi palo, joka poltti suurimman osan venttiilin sisäisistä osista sekä niitä ympäröivästä rungosta. Virtaussuunnassa oleva putki ja laipat paloivat puhki. Operaattori kuoli.

Venttiili oli ollut käytössä viiden vuoden ajan, mutta sitä ei tänä aikana oltu suljettu kuin ehkä kerran. Venttiilin vaurioiden tarkastelu osoitti, että sulkuelimen tulopuolella ei ollut merkkejä metallin palosta tai sulamisesta. Sen sijaan menopuolella metalli on merkittävästi palanut ja sulanut. Palon ja sulan metallin virtauksen jäljet olivat symmetrisiä. Näiden vaurioiden pääteltiin syntyneen ennen kuin putki oli palanut puhki.

Toinen merkittävä havainto oli, että venttiilin runko oli eniten palanut käsipyörän vastakkaiselta puolelta. Karan ja pallon yläosat olivat palaneet kokonaan. Kolmas merkittävä havainto tehtiin pallon jäljellä olevien kappaleiden perusteella. Pallo oli pahiten palanut tulopuolelta, mikä viittasi siihen, että sen oli sytyttänyt tämän puoleinen istukkatiiviste. Menopuolella pallossa ei näkynyt juurikaan palon jälkiä.

Palo oli edennyt virtaussuunnassa pallon yläpuolelta sekä sivuilta katkaisten karan yläosan ja kuluttaen karan alaosa. Tämän jälkeen palo puhkaisi venttiilin rungon molemmilta puolilta.

Palon syttymiselle tunnistettiin kaksi mahdollista alkusyytä:

1. Hiukkasten törmäys.
2. Voiteluaineen syttyminen.

Virtausten numeeriseen simulointiin tarkoitettulla ohjelmalla laskettiin hapen virtauskenttä, kun venttiiliä oli avattu 10° ja 20°. Tulokseksi saatiin, että virtausnopeus oli noin 90 m/s sekä pallon tulo- että menoraossa. Rakojen välisessä tilassa virtausnopeudet olivat 45–60 m/s. Virtauksen mukaansa tempaamat hiukkaset törmäisivät pallon etupintaan sekä venttiilirunkoon. Jomman kumman syttyminen johtaisi palon etenemiseen pallon takapinnan ympäri sekä pallon alapuoliseen sisäpintaan. Nämä pinnat eivät kuitenkaan olleet vaurioituneet simuloinnin ennustamalla tavalla.

Tämän vuoksi voiteluöljyn syttymistä pidettiin palon todennäköisimpänä alkusyynä. Huomattava määrä voiteluöljyä oli jousien paikallaan pitämien istukkatiivisteiden takana. Pelkkä tiivisteiden liike venttiiliä avattaessa syntyvien paine-erojen vaikutuksesta riitti sytyttämään voiteluöljyn. Hapen virtaus raossa oletettavasti nopeutti syttymistä.

Tutkimus korosti jälleen kerran sitä, että paine-ero sulkuventtiilin yli on tasoitettava ennen venttiilin avaamista. Teollisuudessa tämä vaatimus on jo kauan tiedetty, mutta ohjeita laadittaessa ei aina ole huomattu, että jo pienikin paine-ero (tässä tapauksessa 7 % putkiston ylipaineesta) riittää synnyttämään hapen virtausnopeuksia, jotka ylittävät suositusarvot tekijällä 3–10 (Newton & Forsyth 2003).

6.4 PIENILÄPIMITTAISISSA PUTKISTOISSA SATTUNEITA ONNETTOMUUKSIA

Dicker ja Wharton (1988) esittävät yhteenvedon Englannissa vuosina 1982–85 sattuneista happiputkistojen onnettomuuksista. Onnettomuuksia oli kaikkiaan 28, joista 11 liittyi paineensäätimiin, 6 pullojen täyttöön, 5 putkistoihin, 4 muihin säiliöihin ja laitteisiin sekä 2 pulloventtiileihin. Onnettomuudet aiheuttivat 16 henkilön loukkaantumisen. Asiantuntijaviranomainen Health and Safety Executive tutki joitakin näistä onnettomuuksista.

Sairaalan teho-osasto. Kantotelineessä oli kaksi pientä happipulloa. Toinen pullo tyhjentyi ja sen vaihtamista varten teknikko sulki jakoputkiston sulkuventtiilin sekä pulloventtiilin. Täysi pullo liitettiin poistetun tilalle. Pulloventtiilin avaaminen oli hankalaa. Kun venttiilit oli saatu auki, kuului äänekkästä suhinaa, jota seurasi voimakas pamaus ja oranssi välähdys. Teknikko ja sairaanhoitaja loukkaantuivat ja huone täyttyi savusta.

Putkiston tutkimus osoitti, että paineensäätimen liitin puuttui ja liittimen kiristysmutteri oli palon vahingoittama. Paineensäädin oli sisäpuolelta vahingoittumaton. Sulkuventtiilin sisäosat olivat palaneet pois ja paineensäätimen muoviosien ulkopinnassa oli palon jälkiä. Pullojen välinen putkisto oli palanut puhki kahdesta kohdasta. Pulloventtiilin sisäpuoli oli pahoin palanut. Huomattava osa venttiilin rungosta puuttui ja yhdessä kohdassa venttiilin runko oli palanut puhki. Karan holkimutterissa oli mekaanisen vaurion jälkiä ja kara oli murtunut kierteiden kohdalta.

Palon arveltiin alkaneen joko sulkuventtiilin karan hiilivetypohjaisen voiteluöljyn tai palloventtiilin nailonholkin syttymisestä, kun putkistossa ollut happi kuumeni adiabaattisen puristuksen seurauksena. Koska liitin oli ollut käytössä useita vuorokausia ennen paloa, holkin syttymistä pidettiin todennäköisempänä alkusyynä.

Polttoleikkauskone. Hitsaaja vaihtoi polttoleikkauskoneeseen uuden happipullon. Hän liitti paineensäätimen pulloon ja avasi pulloventtiilin. Tällöin liekki välähti ja kuului voimakasta suhinaa. Tämän jälkeen paineensäätimen suurpainepuolelle syttyi liekki.

Paineensäätimen tutkimus osoitti, että suurpainepuolen varoventtiili oli palanut ja viereisen painemittarin pinta oli mustunut. Liekki paloi varoventtiilin luona ja se oli polttanut suuren osan suurpainepuolen venttiilin kannesta. Useat sisäosat olivat hävinneet. Palo eteni myös pienpainepuolelle, jonka kalvo oli palanut.

Koska paineensäädin oli ollut jonkin aikaa käytössä ennen onnettomuutta, siihen kertyneen öljy- tai rasvaepäpuhtauden syttymistä ei pidetty todennäköisenä palon alkusyynä. Vauriot viittasivat siihen, että hapen adiabaattinen puristus venttiiliä avattaessa oli sytyttänyt jonkin suurpainepuolen tiivistestä.

Pullopatteri ulkona. Täysi happipullo liitettiin pullopatterin kaksivaiheiseen paineensäätimeen. Pulloventtiilin avaaminen aiheutti räjähdysten, joka jälkeen liekit paloivat ja sulaa metallia roiskui kahdesta paineensäätimen aukosta. Palo sammui, kun pulloventtiili suljettiin.

Paineensäätimen tutkimus osoitti, että sen liittimeen oli kertynyt kierteiden tiivistysnauhaa. Messinkiliittimen sisäpinnan värinmuutos osoitti sen kuumentuneen. Sintratusta metallista valmistettu sihti oli osittain mustunut ja siinä oli pieniä reikiä. Pulloventtiilin muovikuvun kappaleita oli vent-

tiilin sisällä.

Pääteltiin, että tiivistenauha syttyi hapen adiabaattisen puristuksen seurauksena. Myös muovikuvun kappaleiden syttymistä pidettiin mahdollisena alkusyynä.

Pullopatteri sisällä. Huoneessa oli kaksi kuuden happipullon ryhmää. Työntekijä sulki toisen ryhmän eristysventtiilin, avasi toisen ryhmän pullojen venttiilit ja tämän jälkeen eristysventtiilin. Tällöin kaksivaiheinen paineensäädin räjähti. Paineensäätimen kappaleita osuivat työntekijään ja hänen vaatteensa syttyivät palamaan.

Pienpainepuolen paineensäätimen kansi oli puhjennut, säätimen sisällä oli metallipalon jälkiä ja kumikalvo ja tukilevy olivat palaneet lähes täysin. Suurpainepuolella ei ollut havaittavissa muita palon jälkiä kuin pienpainepuolelle johtavan aukon laajeneminen metallin sulamisen seurauksena. Matalapainepuolen putkistossa ei ollut palonjälkiä.

Hapen adiabaattisen puristuminen voitiin sulkea pois, koska paineensäädintä ei oltu irrotettu eikä jakoputkiston painetta alennettu. Vaurioiden perusteella palon pääteltiin alkaneen suurpainepuolelta. Palon oli luultavasti sytyttänyt sihtiin kertynyt pöly tai pulloventtiilistä tai pullon sisältä irronnut vieras aine.

Täyttölaitos. Hengityslaitteiden happipulloja täytettiin kompressorilla isosta kaasupullosta noin 120 baarin paineeseen. Täytettävä pullo liitettiin liittimeen, paine-eron annettiin tasoittua ja kompressori käynnistettiin. Noin 5 s kompressorin käynnistämisen jälkeen kuului pamaus ja liekki löi ulos liittimestä. Ison pullon pulloventtiili suljettiin ja palo sammutettiin.

Laitteiston purkamisen jälkeen todettiin, että täyttöyhteen sulkuventtiili oli suurelta osalta palanut ja täyttöyhteen liitosputki oli puhjennut. Sulkuventtiilin tulopuolella ei ollut palon jälkiä. Vain liittimen pinta oli vaurioitunut. Täytettävänä ollut pullo ei ollut vahingoittunut, vaikkakin pulloventtiilin karan holkki oli sulanut. Putkistoa koottaessa oli käytetty silikonirasvaa, jota oli jäljellä kaikissa liitoksissa. Laitteiston toisen samanlaisen sulkuventtiilin rungossa ja istukassa todettiin ruostetta. Lisäksi kara ja istukan osat olivat paksun silikonirasvakerroksen peittämiä.

Pääteltiin, että palo oli syttynyt sulkuventtiilissä ja edennyt liittimeen sekä liitosputkeen ja että palon lämpö oli sulattanut pulloventtiilin holkin. Syttymissyitä ei pystytty varmasti päättelemään. Todennäköisesti syttyminen johtui sulkuventtiilissä olleesta rasvasta, ruosteesta tai muista epäpuhtauksista.

Newton, Hull ja Stradling (2000) tekevät yhteenvedon 11:stä lääkintälaitteiden alumiinirunkoisen paineensäätimen palosta. Vuosina 1993–99 sattui USA:ssa 16 tällaista paloa, jotka aiheuttivat palovammoja 11 henkilölle. Yhdeksän paloa 11:stä syttyi välittömästi venttiilin avaamisen jälkeen ja kaksi muuta 5–6 minuutin kuluttua venttiilin avaamisesta. Vaikka USA:ssa tällaisia paineensäätimiä valmisti ainakin kahdeksan yritystä, palaneet säätimet olivat yhtä lukuun ottamatta saman valmistajan tuotteita. Palojen takia tämä valmistaja oli vuonna 1997 pyytänyt paineensäätimien ostajia vaihtamaan alkuperäisen ruostumattomasta teräksestä valmistetun verkkosihdin sintratusta pronssista valmistettuun. Tällaiset sihdit kuitenkin pääsivät pienet hiukkaset lävitseen ja tukkeutuivat helposti suuremmista hiukkasista. Vuonna 1999 valmistaja ilmoitti vaihtavansa kaikki alumiinirunkoiset paineensäätimet pronssirunkoisiin (Miller 1999).

Springfield, Oregon 1993. Sairaankuljettajat olivat siirtämässä potilasta kotoa ambulanssiin, kun

paareihin hihnoilla kiinnitetty happipullo iski oven metallikarmiin. Kuului suhinaa ja näkyi kirkas tulipallo. Toinen sairaankuljettaja sai palovammoja. Ennen iskua potilaalle oli annettu happea noin 6 minuutin ajan.

Paineensäätimen suurpainepuolen messinkisuutin oli sulanut tai palanut. Ruostumattomasta teräsverkosta valmistettu sihti oli palanut. Paineensäätimen palovauriot viittasivat siihen, että palo oli syttynyt lähellä paineensäätimen tulosuutinta ja sytyttänyt alumiinirungon. Mahdollisesti pulloventtiilin istukkatieviste tai tuloyhteen tiiviste oli syttynyt ensin. Palovauriot eivät kuitenkaan tuke-neet jälkimmäistä oletusta. Hiukkasten tempautuminen mukaan hapen virtaukseen, kun pullo iski oven karmiin, ja törmäminen sihtiin sekä sihdin syttyminen tästä syystä oli myös mahdollista.

Greeley, Colorado 1995. Paineensädin syttyi palamaan, kun sairaankuljettaja avasi happipullon venttiilin antaakseen potilaalle happea. Tulipallo ympäröi pullon ja paineensäätimen ja aiheutti sairaankuljettajalle palovammat. Hän vaistomaisesti sulki venttiilin.

Paineensäätimen sisäosien ja rungon todettiin osittain palaneen. Vauriot osoittivat, että palo syttyi paineensäätimen istukan läheisyydessä ja eteni hapen virtaussuunnassa. Alumiinirunko syttyi lähellä suurpainepuolen painemittarin aukkoa. Messinkisuuttimessa ei ollut vaurioita, mutta ruostumattomasta teräsverkosta valmistettu sihti oli palanut. Painemittarin putkijousessa havaittiin hiilivetyjämiä. Kymmenen uuden painemittarin putkijouset tutkittiin ja niissä havaittiin 2–20 mg hiilivetyjä. Tällä perusteella pääteltiin, että hapen adiabaattinen puristuminen sytytti putkijousessa epäpuhtautena olleet hiilivedyt.

Boone, North Carolina 1995. Sairaankuljettajat olivat antaneet potilaalle happea noin 5 minuutin ajan. Kun potilaan siirto ambulanssiin aloitettiin, happipullon kantolaukussa syttyi palo. Laukusta löi liekki ja metallikuonaa lensi ulos.

Paineensäätimen runko oli palanut puhki. Paineensädin oli vaurioitunut eniten tuloyhteen luota. Tästä pääteltiin, että palo oli saattanut syttyä pulloventtiilissä. Venttiilin vaurioista pääteltiin, että palo oli alkanut venttiililautasen luota. Venttiilin karan päässä ollut lautanen oli osaksi sulanut ja rautakuonan peitossa. Nailoninen istukkatieviste oli osittain palanut ja pahoin vahingoittunut. Tällä perusteella katsottiin, että teräksestä valmistetussa happipullossa ollut metallipöly oli lähtenyt liikkeelle pullon heilahtaessa ja törmännyt happivirtauksen kuljettamana lautaseen.

Austin, Texas 1996. Happipullon paineensädin syttyi palamaan, kun sairaankuljettaja avasi pullon venttiilin antaakseen potilaalle happea. Hän sulki välittömästi venttiilin.

Paineensäätimen runko paloi puhki ja suurpainepuolen painemittari lensi etäälle. Paineensäätimen vaurioista pääteltiin, että rungon palo oli alkanut säätimen sisällä, läheltä suurpainepuolen painemittarin aukkoa. Istukka oli haljennut ja putkijousi pullistunut sekä haljennut. Pulloventtiilin istukkatieviste oli vahingoittumaton. Vaurioiden perusteella syttymissyiksi pääteltiin putkijousessa olleiden epäpuhtauksien syttyminen, kun happi puristui adiabaattisesti.

Houston, Texas kesäkuu 1996. Sairaankuljettaja avasi happipullon venttiilin antaakseen potilaalle happea. Kuului pamaus, näkyi väläys ja sitten kuului suhinaa. Asunnossa syttyi tulipalo (Miller 1999).

Paineensäätimen rungon osittaisen palamisen seurauksena pienpainepuolen poistoaukot olivat suurentuneet ja alumiinivahvisteinen laippatieviste oli palanut. Vaurioiden perusteella palon pää-

telttiin syttyneen hiukkasten törmättyä tulopuolen sihtiin.

Houston, Texas heinäkuu 1996. Terveystarkastaja poisti kannettavan happipullon ambulanssista ja laski sen maahan. Hän avasi pulloventtiilin vasemmalla kädellä pitäen oikealla kädellä pulloa paikallaan. Hän näki ja tunsu liekit oikean kätensä luona ja sulki heti pulloventtiilin. Tämän jälkeen kuului kiväärin laukausta muistuttava pamaus (Miller 1999).

Paineensäätimen yhden virtausaukon muovitulppa oli vaurioitunut ja PTFE:stä valmistettu istukkatiiviste oli palanut kokonaan. Palo ei ollut päässyt leviämään muihin osiin. Ruostumattomasta teräsverkosta valmistetussa sihdissä havaittiin runsaasti messinki-, PTFE- ja nailonhiukkasia, jotka todennäköisesti olivat peräisin pulloventtiilistä, sekä happipullostä peräisin olevia alumiinihiukkasia. Sihti ei kuitenkaan ollut syttynyt palamaan. Vaurioiden perusteella istukkatiivisteen pääteltiin syttyneen hapen adiabaattisen puristuksen seurauksena. Pulloventtiilin nopea sulkeminen katkaisi syttymisketjun.

Gurnee, Illinois 1997. Palomies avasi ambulanssin happipullon venttiilin päivittäisen tarkastuksen yhteydessä. Tällöin paineensäätimen mittari ei liikahtanut. Kun hän kohotti paineensäädintä tutkiakseen sitä tarkemmin, hän näki kirkkaan välähdyksen ja tunsu polttavaa kipua. Tämän jälkeen ambulanssi syttyi palamaan.

Paineensäätimen tarkastelu osoitti, että palo alkoi säätimen istukkatiivisteen luota. Seuraavaksi syttyi paineensäätimen ja pulloventtiilin välisen liitoksen tiiviste. Alumiininen mäntä paloi sekä paineensäätimen runko puhkesi. Sihdissä havaittiin PTFE-, kupari-, messinki- ja polyfenyylioksidhiukkasia. Ilmeisesti hiukkaset olivat tukkineet sihdin (Miller 1999). Syttymissyyn tutkiminen oli kesken lähdettä (Newton, Hull & Stradling 2000) kirjoitettaessa.

Broward County, Florida 1998. Palomies otti happipullon paloautosta päivittäistä tarkastusta varten. Kun hän avasi pulloventtiilin, paineensäätimestä kuului pamaus ja kaksi noin metrin pituista liekkiä sytyttivät hänen vaatteensa palamaan.

Paineensäätimen pienpainepuolen runko oli palanut puhki kahdesta kohdasta, jotka sijaitsivat poistoaukkojen luona. Pulloventtiilin istukka oli vahingoittumaton. Paineensäätimen rungon vauriot alkoivat sintratusta pronssista valmistetun sihdin luota. Tämä viittasi siihen, että palon sytytti hiukkasten törmäys joko alumiinirunkoon tai sihtiin. Jälkimmäisessä tapauksessa sihti olisi sulanut tai hajonnut tai sen liekki olisi sytyttänyt alumiinin.

Greenville, South Carolina 1998. Sairaankuljettaja tarkasti ambulanssin happipulloa vuoronvaihdon yhteydessä. Hän ei aluksi saanut pulloventtiiliä auki. Sitten hän asetti pullon reittänsä vasten, otti vasemmalla kädellään kiinni pullostä ja käänsi oikealla pulloventtiiliä. Kun hän tällä tavalla sai avattua venttiiliä 1/4–1/2 kierrosta, hän kuuli pamauksen ja pullostä löi liekki, joka aiheutti hänelle palovammoja.

Noin 75 % paineensäätimestä paloi. Lisäksi pullon sisäpinta syttyi palamaan, minkä seurauksena pullon yläosa pullistui ja sitten siihen tuli pituussuuntainen 10 cm pitkä halkeama. Pullistuma aiheutui pullon vaipan paikallisesta kuumenemisestä ja hapen paineesta. Venttiiliyhde oli sulanut tai palanut. Pulloventtiilin tiiviste oli palanut. Kun otettiin huomioon, että venttiiliä oli vaikea avata, pulloventtiilin syttymistä kitkalämmöstä pidettiin mahdollisena. Toisaalta vauriot viittasivat siihen, että palo oli edennyt paineensäätimestä pulloon.

Palon poikkeuksellisen etenemissuunnan arveltiin johtuneen siitä, että painemittarin yhde oli varustettu suoventtiilillä, joka esti runkoa palamasta puhki yhteen luona. Paineensäätimen tuloyhde oli sulanut ruostumattomasta teräksestä valmistetun sihdin luona. Tämä viittasi siihen, että sihti oli syttynyt hiukkasten törmätessä siihen.

Reno, Nevada 1999. Palomies avasi happipullon venttiilin päivittäisen tarkastuksen yhteydessä. Paineensäädin syttyi välittömästi palamaan vajaan metrin pituisella liekillä. Hän pudotti palavan pullon maahan.

Paineensäätimen runko oli palanut puhki pienpainepuolen poistoaukkojen kohdalta. Putoamisen yhteydessä pulloventtiilin kierreosa oli murtunut ja venttiili irronnut pullosta. Pulloventtiilin istukattiiviste oli muuttanut muotoaan, mutta siinä ei ollut palojälkiä. Alumiinirunko oli syttynyt tulosuuttimen ja sintratusta pronssista valmistetun sihdin välistä. Koska jäämiä epäpuhtauksista ei löydetty, syttymisen pääteltiin aiheutuneen hiukkasten törmäyksestä.

Newton, Hull ja Beeson (2000) toteavat, että paineensäätimen palo syttyy yleensä putkiston sisältä, useimmiten pulloventtiilistä tai säätimen suurpainepuolelta. Yleensä epämetalliosat (istukka-, rengas-, kara- tai laippatiivisteet tai kalvot) syttyvät ensin sytyttäen sitten metalliosat (jouset, sihdit, lautasen karat, metallikalvot tai rungon). Vaikeasti syttyvät metallit kuitenkin yleensä sulavat.

On myös esiintynyt kiivaita paineensäätimen paloja, joissa sisäosat eivät juurikaan ole palaneet. Tyypillistä metallin palamista tai sulamista ei ole havaittu ja joissakin tapauksissa paineensäätimen epämetallitkin ovat palaneet vain vähän. Tällaisia paloja voidaan luonnehtia pikemminkin räjähdysiksi kuin osien palamiseksi ja sulamiseksi.

Esimerkkinä tekijät kuvaavat vuonna 1995 sattunutta hitsauslaitteiston paineensäätimen räjähdysenomaista paloa. Hitsaaja oli liittänyt yksivaiheisen paineensäätimen happipulloon, mutta ei ollut sitä ennen raottanut pulloventtiiliä puhaltaakseen pois venttiilissä mahdollisesti olleet epäpuhtaudet. Hän ei myöskään ollut tarkastanut venttiilin kuntoa silmämääräisesti. Hän liitti happiletkun paineensäätimeen ja avasi pulloventtiilin. Koska suurpainepuolen painemittari nousi tällöin noin 170 baarin paineeseen, hitsaaja alkoi säätää painetta kahvasta samalla sulkien peukalolla letkun pään. Letkusta ei virrannut juuri lainkaan happea ulos ja pienpainepuolen mittari näytti nollaa. Sitten hän kuuli paineensäätimestä suhinaa ja ennen kuin hän ehti sulkea pulloventtiilin, paineensäädin räjähti. Paineensäädin oli ollut käytössä vuosina 1971–90 ja tämän jälkeen sitä oli säilytetty alkuperäispakkauksessaan onnettomuuspäivään asti.

Pulloventtiilissä havaittiin jäänteitä ampiaisen tai petopistiäisen pesästä. Elektronimikroskooppikuvassa näkyi hyönteisten kitiinikuoren kappaleita. Petopistiäisen pesästä otetun materiaalinäytteen itsesyttymislämpötilaksi saatiin 122 °C ja lämpötilan nousuksi syttymisen jälkeen 287 K, mikä oli osoituksena kyseisen materiaalin korkeasta palamislämmöstä. Tällä perusteella pääteltiin, että pulloventtiilissä oli jäänteitä petopistiäisen pesästä sekä saalishyönteisistä. Kun hitsaaja avasi pulloventtiilin, osa jäänteistä lähti liikkeelle tukkien väliaikaisesti paineensäätimen sihdin. Venttiilin ja sihdin välinen tila kuumeni hapen adiabaattisen puristuksen seurauksena sytyttäen jäänteet ja nailonisen istukattiivisteen palamaan. Koska palaminen tapahtui suljetussa tilassa ja puristetussa hapessa, se oli erittäin nopeaa, mikä selittää paineen nopean nousun huomattavasti paineensäätimen suunnittelupainetta korkeammaksi.

7 YHTEENVETO

Happiputkistojen rakennemateriaalien valintaa varten on kehitetty erilaisia testausmenetelmiä. Menetelmillä pyritään löytämään sellaiset materiaalit, joiden syttymistodennäköisyys happiputkistojen käyttöolosuhteissa on mahdollisimman pieni, joissa palo ei leviä ja jotka tuottavat pallessaan mahdollisimman vähän lämpöä.

Metallien luokittelu tehdään kolmen ASTM:n kehittämän testausmenetelmän perusteella:

1. *Kitkakuumennustestissä* metallinkappaletta pyöritetään ja puristetaan toista metallinkappaletta vasten hapessa. Muuttujina ovat puristusaine, pyöritysnopeus sekä hapen paine.
2. *Hiukkasten törmäytestissä* yksi tai useampia hiukkasia kulkeutuu hapen virtauksen mukana päin koekappaletta. Ennen törmäystään koekappaleeseen hiukkaset ovat jo saattaneet törmäysten seurauksena kuumentua hehkuviksi. Hiukkaset voivat myös syttyä palamaan törmäytessään koekappaleeseen. Muuttujina ovat hapen paine, lämpötila ja nopeus, hiukkasten materiaali, koko, lukumäärä ja törmäysnopeus.
3. *Indusoidun palamisen testissä* hapessa oleva koekappale sytytetään sopivalla sytyttimellä. Tästä testistä on useita muunnoksia. Sytytin voidaan standardoida ja hapen painetta tai koekappaleen lämpötilaa vaihdella, jolloin metallit, jotka eivät syty, ovat suositeltavampia kuin metallit, jotka syttyvät. Sytytysenergiaa voidaan vaihdella, jolloin metallit luokitellaan pienimmän syttymiseen tarvittavan energian perusteella. Voidaan myös käyttää niin suurta sytytysenergiaa, että kaikki tutkittavat metallit syttyvät, ja luokitella metallit palon etenemisnopeuden perusteella.

Happiputkistojen suunnitteluopas (EIGA 2002) mainitsee seuraavat syttymismekanismit, jotka voivat johtaa putken murtumiseen:

- metalli- tai epämetallihiukkasten törmäminen putkiston metalliosiin
- hapen adiabaattinen puristus, akustinen resonanssi tai virtauskitka, joka nostaa lämpötilaa
- orgaanisten materiaalien tai virtauksen mukanaan kuljettamien epäpuhtauksien syttymisen aloittama syttymisketju
- hankauskitka esimerkiksi venttiilin liikkuvan ja kiinteän osan välillä
- staattisen sähköön kipinä metalliosien välillä
- ylikuumeneminen, joka johtuu joko prosessihäiriöstä tai happivuodon ylläpitämästä putkiston ulkopuolisesta palosta
- palavan aineen tahaton sekoittuminen hapen kanssa joko prosessihäiriön tai kunnossapito- tai muutostyön yhteydessä.

Yleisiä suunnitteluperiaatteita ovat:

- valitse sopivat epämetalliset materiaalit ja pidä niiden määrä mahdollisimman pienenä
- pidä happiputkisto puhtaana
- vältä hiukkasia esimerkiksi suodattamalla
- vältä erityisesti pölyloukkuja ja pintoja, joihin hapen virtaus törmää
- valitse sopivat metalliset materiaalit
- noudata hyvää laitteiden suunnittelu- ja sijoittelukäytäntöä
- rajoita palojen seuraukset mahdollisimman vähäisiksi sopivilla palontorjuntamenetelmillä.

Epämetallisten materiaalien osalta tulisi noudattaa seuraavia sääntöjä:

- upota epämetalliset komponentit paloa kestävien metalliosien keskelle, jotta lämpö pääsisi helposti siirtymään epämetallista metalliin

- vältä epämetallisten komponenttien sijoittamista kosketukseen virtaavan hapen kanssa
- estä komponenttien liiallinen liikkuminen
- varmista, että materiaali on fysikaalisesti ja kemiallisesti stabiilia prosessiolosuhteissa
- varmista, että epämetallinen komponentti ei eristä metalliosia toisistaan.

Palavat aineet syttyvät itsestään ilmassa ja hapessa, kun niiden lämpötila on tarpeeksi korkea. Tätä lämpötilaa kutsutaan itsesyttymislämpötilaksi tai syttymislämpötilaksi. Metallien itsesyttymislämpötilat ovat paljon korkeampia kuin kysymykseen tulevat käyttölämpötilat. Metallien itsesyttymislämpötilan määrittämistä varten ei ole standardoitua testausmenetelmää. Lisäksi testaukseen liittyy useita ongelmia, jotka rajoittaisivat testaustuloksen soveltamista: koekappaleen koon, muodon ja lähiympäristön sekä oksidikerroksen vaikutus, lämpötilan mittausero sekä vaikeus päätellä, milloin koekappale on syttynyt.

Metalli voi syttyä huomattavasti alemmassa lämpötilassa, jos sen oksidikerros on vahingoittunut esimerkiksi säröilyn, hankauksen tai kulumisen seurauksena. Metalleista ainoastaan titaani on osoitettu syttyvän hapetusreaktion lämmöstä, kun pintaa suojaava oksidikerros poistetaan ja tuoreelle metallipinnalle muodostuu uusi oksidikerros. Kuitenkin toisilla metalleilla tuoreen pinnan paljastuminen saattaa helpottaa syttymistä hankauskitkan, hiukkasten törmäyksen ym. tekijöiden vaikutuksesta.

Ruostumattoman teräksen hapessa mitattu syttymislämpötila 1360 ± 30 °C on käytännöllisesti katsoen sama kuin sulamislämpötila. Kokeissa, joissa on muodostettu tuore metallipinta katkaisemalla metallipuikko, ruostumaton teräs on syttynyt huomattavasti alemmassa lämpötilassa. Kokeissa, jossa metallipuikkoa kuumennettiin sähkövirralla ja puikko katkaistiin, murtumapintojen välillä iskenyt sähkökipinä sytytti pinnat palamaan 400 °C:n lämpötilassa, kun virtaavan hapen paine oli 34,5 bar.

Happiputkistoissa käytettävistä epämetalleista korkein itsesyttymislämpötila on PTFE:llä (teflon). Esimerkiksi 34 baarin paineessa PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi on saatu 418 °C. Voiteluöljyn itsesyttymislämpötila on noin 200 °C.

Hankauskitkatestissä käytettiin kahta tutkittavista metalleista valmistettua putken pätkää, jotka puristettiin toisiaan vasten. Toinen putken pätkä oli kiinteä ja toista pyöritettiin nopeudella 1000–20 000 kierrosta minuutissa. Putkien kosketuspinta oli noin $1,8 \text{ cm}^2$. Putket olivat kammiossa, josta paineistettiin hapella 7–207 baarin paineeseen. Koekappaleet painettiin vastakkain ja niiden puristusta kasvatettiin nopeudelle 0,17 MPa/s kunnes ne syttyivät tai murtuivat tai puristuksen suurin arvo saavutettiin. Metallien luokitteluperusteeksi valittiin se puristuspaineen P ja kosketuspinnan keskimääräisen nopeuden v tulon Pv arvo, jolla koekappale syttyi palamaan. Tämä suure riippui hapen paineesta. Testitulosten tulkinta ja yleistäminen osoittautui kuitenkin vaikeaksi.

Hapen kuumeneminen adiabaattisen puristuksen seurauksena on ongelmana korkeapaineisissa happiputkistoissa (esimerkiksi kaasupulloihin liitetyt putkistot), joissa puristuneen hapen lämpötila voi ylittää epäpuhtauksien ja epämetallisten komponenttien (esim. PTFE-letkut) itsesyttymislämpötilan.

Metallien syttyminen mekaanisesta iskusta on paljon epätodennäköisempää kuin epämetallien syttyminen. Epämetallien syttyminen iskusta on todennäköisempää ja niiden syttymisherkyyden luokitteluun käytetään standardin ASTM G 86 mukaista testiä. Testissä paino pudotetaan vastakappaleen päälle, joka välittää iskun koekappaleeseen iskevään iskuripuikkoon. PTFE:tä ei saatu

syttymään edes puhtaassa hapessa missään paineessa eikä suurimmallakaan energialla.

Happivirtauksen kuljettamat metallihiukkaset voivat syttyä, jos niissä on mukana hapettumatonta metallia ja niiden nopeus on tarpeeksi suuri. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kohtio saatiin syttymään, kun siihen törmäävien rautahiukkasten halkaisija oli 50–150 µm ja nopeus vähintään 50 m/s. Sen sijaan kohtio ei syttynyt PTFE-hiukkasten (halkaisija 250 µm) eikä -kuulien (halkaisija 1 mm tai 2 mm) törmäyksestä. Myöskään PTFE-kohtiota ei saatu syttymään alumiinikuulilla (halkaisija 2 mm), jotka kylläkin sytyttivät ruostumattomasta teräksestä valmistetun kohtion.

Happivirtauksen kuljettama pölyn staattinen varautuminen on mahdollista, mutta kun otetaan huomioon kaasun kuljettamien hiukkasten luonne ja pitoisuus sekä putkivarusteiden yhteys toisiinsa, niin varauksen purkautuminen ei pysty sytyttämään happiputkea palamaan. Käytännön kokemus happiputkistoista on osoittanut, että epämetallien syttyminen staattisen sähköön kipinästä on epätodennäköistä.

Palon leviämistä metalleissa on tutkittu sytyttämällä metallipuikko alapäästään öljyllä. Tarvittaessa lisäsytyttimenä on käytetty puikon alapään ympärille kiedottua 0,5 mm:n rautalankaa. Kokeiden perusteella on määritetty pienin hapen paine, jossa näin sytytetty metallipuikko palaa kokonaan. Tätä kutsutaan kynnyspaineeksi. Myöhemmät kokeet kuitenkin osoittivat, että kynnyspaine riippuu olennaisesti koejärjestelyistä, minkä vuoksi sen soveltuvuus happiputkistoihin on kyseenalaista.

Kymmenestä tietokannasta sekä Internetistä tehty tiedonhaku tuotti vain kolme kuvausta suuriläpimittaisen happilinjan venttiilipalosta, jotka kaikki (ilmeisesti) ovat sattuneet USA:ssa. Yksi onnettomuus sattui neste- ja kaksi kaasuventtiilillä. Lähteissä on myös käytännön kokemuksia tällaisten onnettomuuksien tutkinnasta. Kaasupulloihin liitetyt pieniläpimittaiset putkistot ovat paljon yleisempiä kuin suuriläpimittaiset ja niillä sattuneiden onnettomuuksien tutkintaa on kuvattu useassakin lähteessä.

Vuonna 1992 nestehappijärjestelmän varoventtiili syttyi palamaan toimiessaan, kun venttiililautasen hankauskitka sytytti venttiilin ruostumattomasta teräksestä valmistetun sisäpinnan palamaan.

Vuonna 2000 teollisuuden happijärjestelmän uuden ilmanpoistoyksikön 305 mm:n läppäventtiili paloi käyttöönoton loppuvaiheessa. Ilmanpoistoyksikön kompressorit olivat käyneet useita tunteja puristaen ensin ilmaa ja sitten hapen ja ilman seosta. Koko tämän ajan läppäventtiili oli ollut kiinni. Kaasuseosta kierrätettiin järjestelmässä kunnes sen happipitoisuus oli saavuttanut tasapainoarvonsa. Sen jälkeen, kun happipitoisuus oli saavuttanut hyväksyttävän minimiarvonsa 99,6 %, kierrätystä jatkettiin vielä 1,5–2 tunnin ajan. Tämän jälkeen läppäventtiili avattiin valvomosta käsin. Venttiili syttyi palamaan heti, kun sen läppä raottui ja rakoon syntyi kuristettu virtaus. Venttiilin vaurioiden perusteella teräksen syttymisellä pääteltiin olevan kaksi todennäköistä alkusyytä:

1. Hiiliteräksestä valmistetun laipan syttyminen hiukkasten törmäyksestä.
2. Venttiilin tulopuolelle muodostunut syttymisketju.

Läpän vaurioiden perusteella voitiin laipan syttyminen hiukkasten törmäyksistä sulkea pois ja keskittyä syttymisketjun tunnistamiseen. Kokemuksen mukaan venttiilin ja putkiston vauriot syntyvät syttymiskohdan alapuolelle hapen virtaussuunnassa. Kitkaholkin materiaalit analysoitiin kemiallisesti. Osoittautui, että yksi materiaaleista oli fenolipohjainen. Fenolipolymeereja käytetään ylei-

sesti holkkien rakenneaineena ja niiden itsesyttymislämpötila on luokkaa 155 °C, joka oli lähellä prosessin 132 °C:n lämpötilaa. Vähäinen kitkalämpö venttiiliä avattaessa riitti kuumentamaan holkin sidosaineena käytetyn fenolipolymeerin syttymislämpötilaansa.

Kuitenkin sidosaineen määrä tuskin riitti sytyttämään Inconel 718 -metallista valmistettua venttiilikaraa tai viereistä hiiliteräslaippaa. Syttymisketjun seuraava lenkki oli todennäköisesti PCTFE-istukan ja Viton-tukirenkaan syttyminen erityisesti karan lähiympäristössä, missä virtausnopeudet olivat pieniä. Istukan ja tukirenkaan palamisesta syntynyt lämpö puolestaan riitti sytyttämään laipan ja karan.

Vuonna 2001 teollisuuslaitoksen happilinjän sulkuventtiilinä käytetty 152 mm:n palloventtiili syttyi palamaan tiiveystarkastuksen yhteydessä. Tarkastus tehtiin sulkemalla venttiili ja laskemalla menopuolen hapen painetta 38 baarista 35 baariin. Tämän jälkeen venttiilin avaaminen aloitettiin käsipyörää kääntämällä. Tällöin venttiilin sisällä syttyi palo, joka poltti suurimman osan venttiilin sisäisistä osista sekä niitä ympäröivästä rungosta. Virtaussuunnassa oleva putki ja laipat paloivat puhki.

Palon pääteltiin syntyneen joko hiukkasten törmäyksen tai voiteluöljyn syttymisen seurauksena. Venttiilin osat, joihin hiukkaset olisivat voineet törmätä riittävän suurella nopeudella, eivät kuitenkaan olleet vaurioituneet. Siksi palon todennäköisenä syynä pidettiin istukkatiivisteen takana olleen voiteluöljyn syttymistä.

Englannissa oli tutkittu viisi happipulloihin liitetyn putkiston paloa. Palojen pääteltiin johtuneen hapen adiabaattisesta puristumisesta, kun putkisto paineistettiin. Tällöin epäpuhtaudet tai tiivistet syttyivät.

Vuosina 1993–99 sattui USA:ssa 16 lääkintälaitteiden alumiinirunkoisen paineensäätimen paloa, jotka aiheuttivat palovammoja 11 henkilölle. Yhdeksän lähteessä kuvatuista 11:stä palosta syttyi välittömästi venttiilin avaamisen jälkeen ja kaksi muuta 5–6 minuutin kuluttua venttiilin avaamisesta. Vaikka USA:ssa tällaisia paineensäätimiä valmisti ainakin kahdeksan yritystä, palaneet säätimet olivat yhtä lukuun ottamatta saman valmistajan tuotteita. Palojen syynä oli joko epäpuhtauksien tai tiivisteiden syttyminen hapen adiabaattisen puristuksen seurauksena tai virtauksen kuljetaman metallipölyn törmääminen venttiilin runkoon, lautaseen tai sihtiin.

LÄHDELUETTELO

Anon. 1990. Materials for oxygen service. Teoksessa: McKetta, J. & Cunningham, W. (toim.). Encyclopedia of chemical processing and design. Vol. 33. New York, Basel: Marcel Dekker. S. 75-83. ISBN 0-8247-2480-1.

ASTM 2003. Committee G04 on compatibility and sensitivity of materials in oxygen enriched atmospheres. <http://www.astm.org>

ASTM G 63-99 1999. Standard guide for nonmetallic materials for oxygen service. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 26 s.

ASTM G 94-92 1998. Standard guide for evaluating metals for oxygen service. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 24 s.

ASTM G 124-95 2003. Standard test method for determining the combustion behaviour of metallic materials in oxygen-enriched atmospheres. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 8 s.

ASTM G 128-02 2002. Standard guide for control of hazards and risks in oxygen enriched systems. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 14 s.

ASTM G 145-96 2001. Standard guide for studying fire incidents in oxygen systems. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 10 s.

Barthelemy, H. & Vagnard, G. 1988. Ignition of PTFE-lined hoses in high-pressure oxygen systems: test results and considerations for safe design and use. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 289–304. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Bates, C. E., Wren, J. E., Monroe, R., Pears, C. D. 1979. Ignition and combustion of ferrous metals in high pressure, high velocity, gaseous oxygen. Journal of Materials for Energy Systems, vol. 1, no. 1, s. 61–76. ISSN 0162-9719.

Benz, F. J. & Stoltzfus, J. M. 1986. Ignition of metals and alloys in gaseous oxygen by frictional heating. Teoksessa: Benning, M. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 2. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 38–58. (ASTM Special Technical Publication 910). ISSN 0066-0558.

Benz, F. J., Williams, R. E. & Armstrong, D. 1986. Ignition of metals and alloys by high-velocity particles. Teoksessa: Benning, M. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 2. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 16–37. (ASTM Special Technical Publication 910). ISSN 0066-0558.

Bolobov, V. I., Berezin, A. Yu., Drozhzin, P. F. & Shteinberg, A. S. 1991. Ignition of compact stainless steel specimens in high pressure oxygen. Combustion, Explosion and Shock Waves, vol. 27, no. 3, s. 263–266. ISSN 0010-5082.

Bryan, C. J., Hirsch, D. B., Haas, J. & Beeson, H. D. 2000. Ignitability in air, gaseous oxygen, and oxygen-enriched environments of polymers used in breathing-air devices, final report. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 87–100. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Bryan, C. J., Stoltzfus, J. M. & Cunaji, M. V. 1991. An assessment of the metals flammability hazard in the Kennedy Space Center oxygen system. Teoksessa: Stoltzfus, J. M. & McIlroy, K. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 5. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 453–462. (ASTM Special Technical Publication 1111). ISSN 0066-0558.

Chou, T. C. & Fiederowicz, A. 1997. Oxygen compatibility of polymers including TFE-Teflon, Kel-F 81, Vespel SP-81, Viton A, Viton A-500, Fluorel, Neoprene, EPDM, Buna-N and Nylon 6,6. Teoksessa: Royals, W. T., Chou, T. C. & Steinberg, T. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 8. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 319–349. (ASTM Special Technical Publication 1319). ISBN 0-8031-2401-5.

Dees, J., Forsyth, E., Gunaji, M. V. & Stoltzfus, J. M. 1995. Evaluation of polymers as ignition sources during particle impact in oxygen. Teoksessa: Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 7. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 143–151. (ASTM Special Technical Publication 1267). ISSN 0066-0558.

De Wit, J. R., Steinberg, T. A. & Haas, J. P. 2000. ASTM G 124 test data for selected Al-Si alloys, Al-composites, binary alloys and stainless steels. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 179–189. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Dicker, D. W. G. & Wharton, R. K. 1988. A review of incidents involving the use of high-pressure oxygen from 1982 to 1985 in Great Britain. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 318–327. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Dieguez, J. M., Bothorel, L., de Lorenzo, A. & Faupin, A. 1988. Ignition testing of hollow vessels pressurized with oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 368–388. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Fano, E., Faupin, A. & Barthelemy, H. 2000. Selection of metals for oxygen valves. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 38–56. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Forsyth, E. T., Gallus, T. D. & Stoltzfus, J. M. 2000. Ignition resistance of polymeric materials to particle impact in high-pressure oxygen. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 101–116. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Frohberg, M. G., Brandis, H., Preisendanz, H. & Dörr, G. 1978. Untersuchungen über elektrostatische Aufladungserscheinungen in Leitungen beim Sauerstoffblasen. Thyssen Edelstahl Technische Berichte, vol. 4, no. 2, s. 99–110.

Gunaji, M. V., Dobbin, D., Stoltzfus, J. & Beeson, H. 1985. Design of high pressure oxygen systems – practical suggestions. High Pressure Technology, ASME Pressure Vessels and Piping Division, vol. 297, s. 21–28. ISSN 0277-027X.

Homa, J. & Stoltzfus, J. M. 1993. The measurement of the friction coefficient and wear of metals in high-pressure oxygen. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 389–401. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.

EIGA 2002. Oxygen pipeline systems. Brussels: European Industrial Gases Association. 71 s. (IGC Doc 13/02/E)

Janoff, D. D., Bamford, L. J., Newton, B. & Ryan, C. J. 1989. Ignition of PTFE-lined flexible hoses by rapid pressurization with oxygen. Teoksessa: Stoltzfus, J. M., Benz, F. J. & Stradling, J. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 4. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 288–308. (ASTM Special Technical Publication 1040). ISSN 0066-0558.

Janoff, D. & Pedley, M. D. 1997. Configurational effects on the combustion of several alloy systems in oxygen-enriched atmospheres. Teoksessa: Royals, W. T., Chou, T. C. & Steinberg, T. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 8. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 147–156. (ASTM Special Technical Publication 1319). ISBN 0-8031-2401-5.

Jenny, R. & Wyssmann, H. 1983. Friction-induced ignition in oxygen. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 150–166. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Kubinski, L. 2003. Fighting fire with fire. Standardization News, vol. 31, no. 7, s. 42–45. ISSN 1094-4656.

McIlroy, K., Zawierucha, R. & Drnevich, R. F. 1988. Promoted ignition behavior of engineering alloys in high-pressure oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 85–104. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

McQuaid, R. W., Sheets, D. G. & Bieberich, M. J. 1983. Determination of autogenous ignition temperatures of a steam turbine lubricating oil in nitrogen and oxygen mixtures. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 43–55. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Miller, T. H. 1999. Fires involving medical oxygen equipment. Washington, DC: Federal Emergency Medical Administration, United States Fire Administration. 31 s.

Monroe, R. W., Bates, C. E., Pears, C. D. 1983. Metal combustion high-pressure flowing oxygen. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 126–149. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Newton, B. & Forsyth, E. T. 2003. Cause and origin analysis of two large industrial oxygen valve fires. Teoksessa: Steinberg, T. A., Beeson, H. D. & Newton, B. E. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 10. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 126–149. (ASTM Special Technical Publication 1454). ISSN 0066-0558.

Newton, B., Hull, W. C. & Beeson, H. 2000. Failure investigation of a welding regulator fire. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 323–340. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Newton, B., Hull, W. C. & Stradling, J. S. 2000. Failure analysis of aluminum-bodied medical regulators. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 295–322. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

NFPA 53 1999. Recommended practice on materials, equipment, and systems used in oxygen-enriched atmospheres. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 56 s.

Nguyen, K. & Branch, M. C. 1987. Ignition temperature of bulk 6061 aluminum, 302 stainless steel and 1018 carbon steel in oxygen. Combustion Science and Technology, vol. 53, s. 277–288. ISSN 0010-2202.

Pedley, M. D., Pao, J. H., Bamford, L., Williams, R. E. & Plante, B. 1987. Ignition of contaminants by impact of high-pressure oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 305–317. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Schoenman, L., Stoltzfus, J. & Kazaroff, J. 1987. Friction-induced ignition of metals in high-pressure oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 105–133. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Shelley, R. M., Janoff, D. D. & Pedley, M. D. 1993. Effect of hydrocarbon oil contamination on the ignition and combustion properties of PTFE tape in oxygen. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 81–94. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.

Shelley, R. M., Wilson, D. B. & Beeson, H. 1997. Combustion characteristics of polymers as ignition promoters. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 223–238. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.

Stoltzfus, J. M., Dees, J. & Poe, R. F. 1996. Guide for oxygen hazards analyses for components and systems. Linthicum Heights, MD: NASA Center for AeroSpace Information. vii + 7 s. (NASA Technical Memorandum 104823).

Stoltzfus, J. M., Benz, F. J. & Homa, J. 1989. The Pv product required for the frictional heating of alloys. Teoksessa: Stoltzfus, J. M., Benz, F. J. & Stradling, J. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 4. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 212–223. (ASTM Special Technical Publication 1040). ISSN 0066-0558.

Stoltzfus, J. M. & Lowery, F. 1995. Overview of the oxygen system safety problem and its solution. Teoksessa: Proceedings, 2nd International Conference on Heat-Resistant Materials, Gatlingburg, Tn, 11–14 September, 1995. s. 621–628. ISBN 0-87170-539-7.

Wegener, W. 1964. Untersuchungen über die sicherheitstechnisch zulässige Strömungsgeschwindigkeit von Sauerstoff in Stahlrohrleitungen. Stahl und Eisen, vol. 84, no. 8, s. 469–475

Werley, B. L. 1983. Oil film hazards in oxygen systems. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 108–125. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Werley, B. L. & Hansel, J. G. 1997. Flammability limits of stainless steel alloys 304, 308, and 316. Teoksessa: Royals, W. T., Chou, T. C. & Steinberg, T. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 8. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 203–224. (ASTM Special Technical Publication 1319). ISBN 0-8031-2401-5.

Williams, R. E., Benz, F. J. & McIlroy, K. 1988. Ignition of steel alloys by impact of low-velocity iron/inert particles in gaseous oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 72–84. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Wilson, D. B. & Stoltzfus, J. M. 1997. Fundamentals of metals ignition in oxygen. Teoksessa: Royals, W. T., Chou, T. C. & Steinberg, T. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 8. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 272–282. (ASTM Special Technical Publication 1319). ISBN 0-8031-2401-5.

Zhu, S. H., Stoltzfus, J. M., Benz, F. J. & Yuen, W. W. 1988. Modeling and data analysis of the NASA-WSTF frictional heating apparatus: effects of test parameters on friction coefficient. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 172–186. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

LIITE 3

Tornion venttiilipalon todennäköiset syttymissyyt



TORNION VENTTIILIPALON TODENNÄKÖISET SYTTYMISSYYT

Kirjoittajat: Risto Lautkaski, Lauri Eerikäinen

Julkisuus: Luottamuksellinen



Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT Prosessit, Ydinvoima ja energiajärjestelmät PL 1604 02044 VTT Hankkeen vastuuhenkilö Risto Lautkaski Hankkeen asiakirjanumero (VTT) PRO1-55T-04	Tilaaja Onnettomuustutkintakeskus Sörnäisten rantatie 33 C 00510 HELSINKI Tilaajan yhdyshenkilö Tuomo Karppinen Tilaajan tilaus- tai viitenumero 251/5 Y ja 346/5 Y
Hankkeen nimi, lyhytnimi ja suoritettunus Vaarallisten aineiden konsultoinnit 35VAKO2002, (C2SU02034)	Selostuksen numero ja sivumäärä Päiväys PRO1/7045/04 31.12.2004 15 s. + liite 25 s.

Tutkimusselostuksen nimi ja kirjoittajat TORNION VENTTIILIPALON TODENNÄKÖISET SYTTYMISSYYT Lautkaski, R., Eerikäinen, L.		
Tiivistelmä Tutkimuksessa on arvioitu Tornion onnettomuudessa palaneen happilinjän sulkuventtiilin avaamisen synnyttämiä hapen lämpötiloja ja virtausnopeuksia, virtauksen kuljettamien hiukkasten saavuttamia nopeuksia ja mahdollisia törmäyskohtia, putkijakson täyttymisaikaa sekä venttiilin osien kuumenemista hankauskitkan vaikutuksesta. Täyttyvään putkijaksoon muodostuvan kaasuseoksen lämpötila arvioitiin kahdessa ideaalitapauksessa. Osittaisen sekoittumisen tapauksessa putkeen virtaava happi puristaa putkessa olevan ilman suljettua päätä vasten. Ilman lämpötilaksi suljetussa päässä arvioitiin 555 °C. Jatkuvan sekoittumisen tapauksessa seoksen lämpötilaksi arvioitiin 142 °C. Putkijakson täyttymisajaksi arvioitiin 13...45 s venttiilin avaustavasta riippuen. Venttiilin kuumenemista hankauskitkan vaikutuksesta arvioitiin olettamalla, että 500 N:n voima vaikutti putkipihtien päässä 0,1 s:n ajan. Jos esim. teho jakautui tasan 0,5 cm²:n kosketuspinnalle, lämpötilan nousuksi arvioitiin 580 K. Toisaalta pinnoista voi irrota hyvin kuumia hiukkasia. Hapen suurimmaksi virtausnopeudeksi venttiilin läpän ja rungon välisessä raossa arvioitiin 300...450 m/s. Tällaisessa virtauksessa halkaisijaltaan 0,1 mm:n teräshiukkaset saavuttavat nopeuden 100 m/s jo 28 mm:n matkalla. Venttiilin todennäköisimmäksi syttymissyiksi pääteltiin kitkakuuennus tai kipinöinti, mutta syttymistä hiukkasten törmäyksen seurauksena ei voida sulkea pois.		
Jakelu: Onnettomuustutkintakeskus	Julkisuus luottamuksellinen	

Hankkeen vastuuhenkilö Risto Lautkaski erikoistutkija	Tarkastus- ja hyväksymisallekirjoitukset Eija Karita Puska ryhmäpäällikkö	Seppo Vuori tutkimuspäällikkö
--	--	----------------------------------

ALKUSANAT

Tornion terästehtaalla 19.9.2003 sattuneessa happiventtiilin palossa kuoli välittömästi kolme työntekijää. Onnettomuustutkintakeskus (OTK) asetti 22.9.2003 tutkijalautakunnan tutkimaan tapahtunutta. OTK tilasi VTT Prosesseilta kirjallisuustutkimuksen happiputkistojen syttymissyistä, joka valmistui 19.12.2003. Kirjallisuustutkimuksessa kävi ilmi, että happiputkiston palo voi syttyä kymmenestä eri syystä.

Vuonna 2004 OTK tilasi VTT Prosesseilta tutkimuksen, jossa arvioitiin sulkuventtiilin avaamisen synnyttämiä hapen lämpötiloja ja virtausnopeuksia, virtauksen kuljettamien hiukkasten saavuttamia nopeuksia ja mahdollisia törmäyskohtia, putkijakson täyttymisaikaa sekä venttiilin osien kuumenemista hankauskitkan vaikutuksesta. Tutkimus on tämän tutkimusselostuksen liitteenä.

OTK tilasi VTT Tuotteet ja tuotanto -yksiköltä onnettomuusventtiilin vaurioita ja saman tyyppisten venttiilien käyttäytymistä kuormituksen alaisena koskevan tutkimuksen sekä tutkimuksen, jossa venttiililäpän värähtelyä ja kuumenemista mitattiin Tornioon rakennetussa koelaitteistossa. Näistä tutkimuksista saatua sekä tutkintalautakunnan eri lähteistä hankkimia tietoja on käytetty hyväksi tätä tutkimusselostusta laadittaessa. Tutkimusselostuksen luonnos on ollut tutkintalautakunnan käytössä ja tekijät haluavat kiittää lautakunnan jäseniä saamastaan palautteesta.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	1
2	MAHDOLLISET SYTTYMISSYYT	1
3	SYTTYMISSYIDEN ARVIOINTI.....	4
3.1	HANKAUSKITKA.....	4
3.2	ADIABAATTINEN PURISTUS.....	8
3.3	HIUKKASTEN TÖRMÄYS	9
3.4	KEMIALLINEN REAKTIO	11
3.5	VIRTAUKSEN AIHEUTTAMA MEKAANISEN KOMPONENTIN VÄRÄHTELY	12
4	TUNNISTETUT SYTTYMISSYYT.....	12
	LÄHDELUETTELO.....	13

**LIITE 1. HAPPIPUTKISTON VENTTIILIONNETTOMUUTEEN LIITTYVÄÄ
TEKNISTÄ TERMODYNAMIIKKAA 25 s.**

1 JOHDANTO

Tornion terästehtaalla 19.9.2003 sattuneessa happiventtiilin palossa kuoli välittömästi kolme työntekijää. Onnettomuus sattui, kun happilinjaa oltiin ottamassa uudelleen käyttöön seisokin jälkeen. Happilinjän läppäventtiili paloi puhki sen jälkeen, kun venttiiliä oli raotettu putkipihdeillä karasta kiertämällä. Putkipihteihin turvauduttiin, koska käsipyörää ei voitu käyttää sokkana toimineen ruuvin katkettua. Ruuvi katkesi, kun venttiiliä yritettiin avata painetta vasten.

Suoritetussa kirjallisuustutkimuksessa (Lautkaski 2003) perehdyttiin happiputkistojen rakennemateriaalien valintaan ja suunnitteluperiaatteisiin, syttymismekanismeihin sekä putkistopalojen tutkintatuloksiin. Kirjallisuustutkimus osoitti, että happiputkistojen paloille on tunnistettu ainakin kymmenen erilaista syttymissyitä. Tämän vuoksi useinkaan ei ole varmasti pystytty osoittamaan tiettyä syytä, vaan esimerkiksi kaksi vaihtoehtoista syytä.

Pääosa tutkituista paloista oli sattunut happipulloihin liitettyssä pieniläpimittaisissa putkistoissa. Tämä on ymmärrettävää, koska happipulloja käytetään erittäin paljon teollisuudessa ja sairaanhoidossa. Suuriläpimittaisten putkistojen paloista löytyi vain kolme kuvausta. Huomioon otettava seikka oli, että putkistopalo syttyi lähes aina pullo- tai sulkuventtiilin avaamisen jälkeen.

Tornion tapauksessa voidaan osa kirjallisuustutkimuksen kymmenestä syttymissyystä voidaan mahdottomina tai epätodennäköisinä sulkea pois. Jäljelle jäävien syttymissyiden arviointia varten on tutkimusselostuksen liitteessä 1 on tehty erilaisia lämpö- ja virtausteknisiä tarkasteluja. Tutkimusselostuksen tekstiosassa yhdistetään liitteen 1 laskelmien tulokset syttymissyitä koskeviin kirjallisuustietoihin sekä venttiilien vauriotutkimusten ja kuormituskokeiden tuloksiin.

2 MAHDOLLISET SYTTYMISSYYT

Syttymisvaaraa havainnollistetaan usein ns. palokolmiolla, jonka sivut ovat happi, palaava aine ja syttymislähde. Kun kaikki kolme tekijää ovat läsnä, kolmio on valmis ja syttyminen tapahtuu. Vain harvat rakennemateriaalit (keraamiset oksidit ja jalometallit) eivät pala hapessa. Käytännössä palokolmion kaksi sivua ovat happiputkistossa aina läsnä ja syttymiseen tarvitaan vain syttymislähde.

Rakennemateriaalit syttyvät itsestään, kun niiden lämpötila on tarpeeksi korkea. Tätä lämpötilaa kutsutaan itsesyttymislämpötilaksi. Syttymislähde luovuttaa materiaalille niin paljon energiaa, että materiaalin lämpötila saavuttaa paikallisesti syttymislämpötilan. Jos happeen kosketuksessa oleva materiaali syttyy tästä kohdastaan, palo tuottaa yleensä niin korkean lämpötilan, että se leviää materiaalissa ja voi myös sytyttää viereiset materiaalit palamaan.

Tornion läppäventtiili ja putkisto oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Ruostumatonta terästä suojaa syttymiseltä sen pinnalle muodostunut oksidikalvo. Niinpä kokeissa on havaittu, että ruostumattoman teräksen syttymislämpötila on käytännöllisesti katsoen sama kuin sulamispiste, esimerkiksi 1360 ± 30 °C. Jos oksidikalvo on paksu, syttymislämpötila on suunnilleen sama kuin oksidin sulamispiste, esimerkiksi 1460 °C (Bolobov ym. 1991). Syttymisen edellytyksenä on siis, että sula teräs pääsee kosketukseen hapen kanssa.

Teräs voi syttyä huomattavasti alemmassa lämpötilassa, jos oksidikerros on vahingoittunut esimerkiksi säröilyn, hankauksen tai kulumisen seurauksena (ASTM G 94-92). Jos jokin energianlähde kuumentaa tällöin paljastunutta tuoretta metallipintaa, teräs voi syttyä. Tuoreen metallipinnan syttymistä hapessa on tutkittu erilaisin kokein. Tulokseksi saadut syttymislämpötilat riippuvat huomattavasti koejärjestelyistä. Esimerkiksi, kun ruostumattomasta teräksestä valmistettua teräspuikkoa kuumennettiin hapessa (paine 34,5 bar) johtamalla sen lävitse sähkövirta ja puikko katkaistiin, muodostuneessa aukossa iskenyt sähkökipinä sytytti puikon palamaan lämpötilassa 400 °C. Jos puikkoa ei katkaistu, se ei syttynyt edes (kokeen korkeimmassa) 815 °C:n lämpötilassa (Bates ym. 1979).

Happiputkiston palossa voi myös ensin syttyä jokin putkiston orgaanisesta materiaalista valmistettu komponentti, yleensä tiiviste, tai putkistoon jäänyt orgaaninen epäpuhtaus. Tiivistemateriaaleista korkein itsesyttymislämpötila on polytetrafluorieteenillä (PTFE, teflon): eri lähteissä ilmoitetut lämpötilat vaihtelivat 418...527 °C (Shelley, Wilson & Beeson 1997, Bryan ym. 2000). Tornion läppäventtiilin tiiviste oli valmistettu grafiitilla lujitetusta PTFE:stä. Tämän materiaalin itsesyttymislämpötilasta ei kirjallisuustutkimuksessa löytynyt mittaustuloksia. Ilmeisesti se ei kuitenkaan olennaisesti poikkea puhtaan PTFE:n syttymislämpötilasta. Tavallisin putkistopaloja aiheuttanut epäpuhtaus on voiteluöljy, jonka itsesyttymislämpötilaksi paineisessa hapessa on mitattu noin 200 °C (McQuaid, Sheets & Bieberich 1983).

Kun putkiston rakennemateriaali, ruostumaton teräs, syttyy jonkin alemmassa lämpötilassa syttyvän materiaalin palon seurauksena, puhutaan syttymisketjusta (kindling chain), indusoidusta syttymisestä (induced ignition) tai indusoidusta palamisesta (induced combustion).

Kirjallisuustutkimuksessa on alkuperäislähteistä (Stoltzfus, Dees & Poe 1996, EIGA 2002, Kubinski 2003) koottu kymmenen syttymismekanismien luettelo:

1. *Hankauskitka*. Putkiston komponentit hankaavat toisiaan vasten. Kuumen kohta saavuttaa kyseistä hapen painetta ja pitoisuutta vastaavan syttymislämpötilan. Esimerkiksi pyörivät tai edestakaisin liikkuvat komponentit sekä edestakaisin liikkuva varoventtiilin sulkuelin.
2. *Adiabaattinen puristus*. Happi puristuu alhaisesta korkeaan paineeseen kuumen tuen samalla. Puristuvan hapen määrällä ei ole merkitystä. Korkea lämpötila sytyttää polymeerimateriaalit tai syttyvät epäpuhtaudet. Esimerkiksi korkeapaineisen happiputkiston suljetussa päässä oleva venttiili tai polymeerillä pinnoitettu letku.

3. *Mekaaninen isku.* Kappale, jolla on riittävän suuri massa tai liikemäärä, voi aiheuttaa muodonmuutoksen ja paljastaa tuoreen metallipinnan. Esimerkiksi magneettiventtiilin lautanen iskee polymeeritiivisteseen.
4. *Hiukkasten törmäys.* Syttyvät hiukkaset törmäävät materiaalin pintaan yli 50 m/s:n nopeudella. Tällöin hiukkaset tai materiaali tai molemmat syttyvät. Esimerkiksi putken epäpuhtaudesta irronneet hiukkaset törmäävät venttiilin nostimeen.
5. *Jännitys tai värinä.* Huonosti lämpöä johtavat materiaalit (esimerkiksi muovit) voivat kuumeta syttymislämpötilaansa jännityksen tai värinän vaikutuksesta. Esimerkiksi putkiston sisään tunkeutuvat kannakoimattomat liitokset.
6. *Staattinen sähkö.* Staattisen sähköön purkaus voi toisinaan kuumentaa materiaalin syttymislämpötilaansa. Esimerkiksi kuivan hapen virtauskitka voi kerätä staattista varausta epämetalliin.
7. *Valokaari.* Valokaaren energia voi sytyttää hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi oikosulku eristetyssä sähkölämmittimessä purkautuu vaipan lävitse happeen.
8. *Kemiallinen reaktio.* Happiputkiston ulkopuolinen kemiallinen reaktio voi tuottaa riittävästi lämpöä sytyttääkseen hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi kemiallisen prosessin tuottama lämpö tai happivuodon ylläpitämä putkiston ulkopuolinen palo.
9. *Akustinen resonanssi.* Suljettuun tilaan muodostuvat akustiset värähtelyt voivat nopeasti nostaa hapen lämpötilaa. Lämpötila nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman arvon, jos mukana on hiukkasia. Jos lämpö ei pääse nopeasti johtumaan pois, se voi sytyttää materiaalin. Esimerkiksi happi virtaa T-kappaleeseen, jonka toinen haara on suljettu.
10. *Virtauksen aiheuttama mekaanisen komponentin värähtely.* Hapen virtaus saa polymeerimateriaalin värähtelemään, jolloin sen lämpötila nousee paikallisesti syttymislämpötilaan. Esimerkiksi esiin pistävä, väärän kokoinen laippatiiviste.

Eräät näistä syistä ovat todennäköisiä epämetallien ja toiset metallien syttymissyitä. Kokemukseen perustuva luokittelu on seuraavanlainen (Gunaji ym. 1995):

- *epämetallit:* mekaaninen isku, adiabaattinen puristus, itsesyttyminen, akustinen resonanssi ja valokaari
- *metallit:* hankauskitka, hiukkasten törmäys ja valokaari.

Seuraavassa arvioidaan, mitkä syttymissyit olivat mahdollisia tai todennäköisiä Tornion onnettomuudessa ja mitkä voidaan luokitella epätodennäköisiksi tai jopa mahdottomiksi.

3 SYTTYMISSYIDEN ARVIOINTI

Tutkinnassa ilmenneiden seikkojen sekä venttiilin teknisten tutkimusten perusteella edellä olevasta luettelosta voidaan epätodennäköisinä tai mahdottomina jättää pois seuraavat syyt:

3. *Mekaaninen isku.* Mekaaninen isku on seurausta riittävän suuren massan tai liikemäärän omaavan kappaleen törmäyksestä. Tornion palo seurasi läppäventtiilin avaamista eikä sitä edeltänyt tällaisen kappaleen isku.
5. *Jännitys tai värinä.* Kun huonosti lämpöä johtavat materiaalit ovat alttiina jännitykselle tai värinälle, ne voivat materiaalin sisäisen kitkan vaikutuksesta kuumeta syttymislämpötilaansa. Tällaisissa olosuhteissa olevia polymeerikomponentteja ei Tornion sulkuventtiilin läheisyydessä ollut.
6. *Staattinen sähkö.* Periaatteessa staattista varausta voi muodostua, kun happivirtauksen mukanaan kuljettamat hiukkaset törmäävät putkistosta sähköisesti eristettyyn komponenttiin. Tornion putkistossa tällaista komponenttia ei ollut.
7. *Valokaari.* Tornion läppäventtiili oli käsikäyttöinen eikä sen yhteydessä ollut sähkölaitteita.
9. *Akustinen resonanssi.* Tässä yhteydessä akustinen resonanssi tarkoittaa suljetussa putkijaksossa olevan hapen kuumenemista tilaan syntyvän seisovan aaltoliikkeen vaikutuksesta. Seisovan aaltoliikkeen syntyminen edellyttää putkijakson resonanssitaajuudella toimivaa herätettä, joka voi olla turbulenttinen virtaus tai värähtelevä tai jaksottaisesti liikkuva kappale. Suljettu putkijakso oli 22 m pitkä, joten siihen mahdollisesti muodostuvan seisovan aaltoliikkeen taajuus olisi ollut noin 10 Hz. Tämä on huomattavasti pienempi kuin läppäventtiilin puhalluskokeissa havaitut resonanssitaajuudet 1...4 kHz (Nieminen 2004). Siten hapen virtaus onnettomuusventtiilin kautta seuraavaan putkijaksoon ei voinut herättää seisovaa aaltoliikettä suljetussa putkijaksossa.

3.1 HANKAUSKITKA

Hankauskitka edellyttää kahden pyörivän tai toistensa suhteen liikkuvan komponentin kosketusta toisiinsa. Liitteessä 1 on arvioitu, kuinka paljon kiinni juuttunut läppä kuumenee, kun sitä avataan putkipihdeillä.

Tilanne eroaa USA:ssa kehitetystä metallien kitkakuumennuksen testauslaitteesta, jossa pyörivää putkenpätkää puristetaan samanlaista putkenpätkää vasten hapessa (Benz & Stoltzfus 1986). Tällöin hankausta todennäköisesti poistaa pinnoilta niitä suojaavan oksidikerroksen, mutta happi ei pääse kosketukseen tuoreen metallipinnan kanssa. Sen sijaan happi on kosketuksessa saumasta pursuavaan sulaan sekä kuumentuneeseen putken seinämään.

USA:ssa Marshallin avaruuslentokeskuksessa nestehappijärjestelmän paine nousi ope-
rintivirheen seurauksena varoventtiilin avautumispaineeseen. Tämän jälkeen varovent-
tiili avautui ja sulkeutui jaksollisesti, kunnes lautasen hankauskitka sytytti venttiilin
ruostumattomasta teräksestä AISI A286 valmistetun sisäpinnan palamaan (Stoltzfus &
Lowery 1995). Varoventtiilin hankaus oli pitempiaikaista kuin Tornion läppäventtiilin
avaaminen ja varoventtiilin sisäpinta, josta edestakaisin liikkuva lautanen hankasi pois
oksidikerroksen, oli koko ajan kosketuksessa happeen. Stoltzfus ja Lowery (1995) eivät
kuitenkaan ole arvioineet metallin saavuttamaa lämpötilaa. Ilman erillisiä kokeita ei voi
sanoa, oliko tuore metallipinta tällöin syttynyt hapen vaikutuksesta selvästi sulamisläm-
pötilaansa alemmassa lämpötilassa.

Jos oletetaan, että Tornion läppäventtiili syttyi kitkakuumennuksen vaikutuksesta, kun
sitä avattiin putkipihdeillä riuhtaisemalla, niin tilanne on erilainen kuin edellä kuvatus-
sa lähteissä. Syttyminen edellyttää, että jossain kohdassa läpän tai sen akselin ja muun
metallisen osan välillä on takertuva kohta, jonka rajapinnassa on suuri pintapaine tai
johon on muuten syntynyt tartunta. Kun pinnat nyt liikkuvat äkisti toistensa suhteen,
niiden välissä kehittyy tehoa, joka kuumentaa ne korkeaan lämpötilaan, paikoitellen
jopa sulamislämpötilaan. Niiden liukuessa edelleen toistensa suhteen tuore, kuumentu-
nut metallipinta joutuu kosketukseen hapen kanssa ja voi syttyä palamaan.

Edellytyksenä palon jatkumiselle on, että palamisen tuottama pintateho ylittää johtumi-
sen, konvektion ja säteilyn jäähdystystehon. Erityisesti johtuminen on tässä tapauksessa
tehokasta, koska nopeasti kuumentunut pintakerros on hyvin ohut ja lämpötilagradientti
suuri.

Venttiilin avaamisessa tehty työ voidaan arvioida esimerkiksi siten, että oletetaan 500
N:n nettovoiman vaikuttavan pihtien päässä kohdassa, joka liikkuu riuhtaisun aikana 0,5
m. Työ on tällöin 250 J. Vastaava keskimääräinen teho saadaan jakamalla työ liikkee-
seen kuluneella ajalla, esimerkiksi jos ajaksi oletetaan 0,1 s, teho on 2500 W. Jos teho
jakautuu tasan 1 cm^2 :n kosketuspinnalle, kumpaankin pintaan kohdistuu pintateho 1250 W/cm^2 .
Liitteessä 1 on vastaavaksi pintalämpötilan nousuksi laskettu 291 K. Jos kos-
ketuspinta on vain $0,5 \text{ cm}^2$, lämpötilan nousu on 580 K. Jos aika on 0,15 s ja teho sama,
lämpötilan nousu on 22 % korkeampi. Suurehko lämpötilan nousu on siis periaatteessa
mahdollinen, jos metalliosien tartunta- tai kosketuspinta on pieni.

Edellä mainittuja keskimääräisiä pintatehoja on kuitenkin melko vaikea saavuttaa, ellei
arvioitu työmäärä vapaudu vielä lyhyemmässä ajassa kuin oletettu 0,1 s. Tämä on peri-
aatteessa mahdollista esimerkiksi siten, että työ varastoituu ensin kimmoisesti rakentee-
seen ja sitten purkautuu äkillisesti. Toisaalta tämä merkitsee kuumen pinnan nopeampaa
jäähdytymistä. Ruostumattomalla teräksellä lämpötilan nousu ulottuu 0,15 s:ssa noin 2
mm:n syvyyteen. Jos kappale on tätä ohuempi (metallitiiviste), pintalämpötila nousee
nopeammin. Kokemuksesta tiedetään, että korkeita pintalämpötiloja saavutetaan melko
helposti kosketuspintojen epätasaisuuksien ja aiemmin muodostuneiden "siltojen" koh-
dalla.

Liitteessä 1 on myös laskettu arvioitua venttiilin juuttumisen irtoamiseen tarvittavaa
momenttia vastaava kara-akselin jousto. Vastaavaksi akselin kiertymäksi saatiin 6° .
Koska venttiilin kierukkavaihde on yksipäisenä ruuvina ja liukulaakeroituna ns. itsepi-

dättävä, akselia oli mahdollista kiertää useita kertoja putkipihdeillä ilman, että venttiilin läppä olisi liikahtanut juuttuneesta asennostaan (jossa läppä saattoi myös olla muutamia asteita kiertynyt) tai käsipyörän akseli olisi kiertynyt takaisin päin. Kun tartunta sitten irtosi, läppä kääntyi nopeasti (jälkeenpäin todettuun) 90°:n kulmaan, jolloin sen sekä rungon väliin muodostuivat tätä kulmaa vastaavat virtausraot.

Tammikuussa 2004 VTT Tuotteet ja tuotanto suoritti kuormituskokeen onnettomuusventtiilin kanssa identtisellä läppäventtiilillä. Kokeessa läppää kuormitettiin 35 baarin painetta vastaavalla 250 kN:n kuormalla. Läppä avautui, kun venttiilin käsipyörää käännettiin noin 100 Nm:n momentilla. Torniossa elokuussa 2004 saatiin toinen, paineistetun putkilinjan sulkeva venttiili auki momentilla, joka oli vain pieni osa tammikuussa mitatusta. Tammikuussa kuormitettu venttiili sahattiin syyskuussa 2004 kolmeen osaan niin, että laakerit voitiin avata ja tarkastaa. Tällöin todettiin, että vaihteen puoleinen laakeri oli ilmeisesti kunnossa, mutta vastakkainen laakeri oli vaurioitunut. Karalaakerin ohueen teräskuoreen kiinnitetty PTFE-pinnoite oli osittain rikkoutunut. Pinnoitteen osittainen puuttuminen selittää läpän suuren liikutteluvastuksen ja viittaa siihen, että laakerissa syntyi akselin ja laakeriholkin metallinen kontakti (Rahka 2004).

Onnettomuusventtiilin kiinni juuttuminen viittaa siihen, että tämänkin venttiilin karalaakeri oli vaurioitunut. Kun venttiiliä avattiin putkipihdeillä, kara ilmeisesti vieräi laakeriholkissa, kunnes pinnoitteen vauriokohtaan muodostunut tartunta irtosi (Rahka 2004). Avaamiseen käytetty työ jakautui tässä kohdassa karan ja laakeriholkin kesken, jotka todennäköisesti kuumenivat lämpötilaan, joka riitti sytyttämään metalleihin kosketuksessa olleen orgaanisen materiaalin. Raossa oli ilmeisesti PTFE-pinnoitteen murusia. On huomattava, että akselin ja laakeriholkin väliin siihen kohtaan, josta PTFE-pinnoite on hävinnyt, muodostui avoin tasku, joka helposti keräsi likaa (Rahka 2004).

Myös materiaalien välinen kitka ja tarttumisominaisuudet ovat tärkeitä toisiinsa kosketuksessa olevien pintojen lämpötilakäyttäytymistä arvioitaessa. Tribologiassa erotetaan mm. adhesiivinen kulumisen, jossa mikrokontaktit johtavat adhesiivisiin metallisiin liitoksiin (ns. kylmähitsautumisiin), jotka sitten leikkautuvat irti kulumishiukkasia synnyttäen. Jos pintapainetta vielä lisätään, adhesiivinen kulumisen muuttuu tahmautumiseksi, jolloin pinta rikkoutuu suurelta alalta ja tuoretta metallipintaa voi paljastua. Lisäksi tällöin voi irrota varsin suuria hiukkasia, jotka ruostumattomalla teräksellä voivat kovettua muokkauslujittumisen vaikutuksesta ja kyntää metallia. Tällöin kitkateho keskittyy hyvin pieneen tilavuuteen kerrallaan ja saattaa synnyttää hyvinkin kuumien hiukkasien. Kiinnipysyvä tai irtoava hiukkanen voi hapen kanssa toimia metallipinnan syttymislähteenä. Tätä ilmiötä ei juurikaan ole tutkittu.

Mekaaniset kipinät ovat pieniä hehkuvia hiukkasia (tyypillinen halkaisija 0,1 mm), joita muodostuu iskun, hankauksen tai hionnan vaikutuksesta. Koska kappaleiden pinnat ovat aina rosoisia, ne koskettavat toisiinsa vain pintojen mikroskooppisten ulkonemien kohdalla. Kun kappaleet liikkuvat toisiinsa nähden, hankauskitka kuumentaa pääasiassa näitä kohtia. Jos metallipintojen välinen paine on tarpeeksi korkea, pintojen ulkonemat voivat kuumeta jopa metallin sulamislämpötilaan. Lisäksi pinnoista voi irrota sula-pisaroita ja kuumia hiukkasia.

Mekaanisten kipinöiden lämpötiloja on määritetty niiden lähettämän lämpösäteilyn perusteella. Esimerkiksi, kun teräsesineellä iskettiin ruosteista teräspintaa, kipinöiden lämpötila oli 1500...2400 °C. Kun teräskappaletta painettiin pyörivää hiomalaikkaa vasten, kipinöiden lämpötila oli 1850 °C ilmassa ja 1400 °C työssä. Lämpötilaero johtui siitä, että sulapisararat paloivat ilmassa mutta eivät työssä (Babrauskas 2003).

Metallin jatkuva palaminen hapessa edellyttää yleensä voimakasta virtausta. Kuitenkin nopeasti kuumenevat ohuet rakenneosat voivat mahdollisesti jatkaa palamistaan myös seisovassa hapessa. Läppäventtiilin metallitiivisteiden kuumenemiseen toispuoleisessa palossa riittää 0,025 s, joten hyvinkin lyhytaikainen kuumennus tai pintapalaminen voi kuumentaa sen. Metallitiivisteiden syttyminen sytyttää helposti siihen kosketuksessa olevan PTFE-tiivisteiden, joka palaa pitempään. Toisaalta 6 mm paksu putken seinämä palaa puhki ruostumattomalla teräksellä noin 10 s:ssä ja hiiliteräksellä noin 3,5 s:ssä. Jos hapen virtaus poistaa tehokkaasti ainetta, puhki palaminen voi olla tätäkin nopeampaa.

Tulosten arviointia varten on liitteessä 1 laskettu läppäventtiiliä seuranneen putkijakson (pituus 22 m) täyttymisaika, kun venttiili avataan putkipihtien kahdella, kolmella tai neljällä kiskaisulla. Kiskaisujen kestoksi on oletettu 0,1 s ja väliajaksi 5 s tai 10 s (yhdessä tapauksessa 30 s). Laskujen tulokset on esitetty liitteen 1 kuvissa, joihin on piirretty massavirta aukossa sekä kaasun paine ja lämpötila täyttyvässä putkijaksossa. Lasku on päätetty hetkeen, jolloin virtaus aukossa muuttaa ensi kerran suuntaansa joko fyysikaalisesta tai numeerisesta syystä. Taulukossa 1 on yhteenveto laskujen tuloksista.

Taulukko 1. Putkijakson täytyminen, kun läppäventtiili avataan putkipihdeillä

oletukset	1. avaus	2. avaus	3. avaus	4. avaus	tasoittuu
2 porrasta, 5 s	150 mm ²	600 mm ²	—	—	16,5 s
2 porrasta, 10 s	150 mm ²	600 mm ²	—	—	20,5 s
3 porrasta, 5 s	67 mm ²	267 mm ²	600 mm ²	—	20,0 s
3 porrasta, 10 s	67 mm ²	267 mm ²	600 mm ²	—	27,5 s
3 porrasta, 10 s	24 mm ²	216 mm ²	600 mm ²	—	29,0 s
3 porrasta, 30 s, 10 s	67 mm ²	267 mm ²	600 mm ²	—	45,0 s
3 porrasta, 10 s	40 mm ²	160 mm ²	360 mm ²	—	36,0 s
4 porrasta, 10 s	37 mm ²	150 mm ²	337 mm ²	600 mm ²	34,0 s

Onnettomuuspaikalta löytynyt hitsauspoltin viittaa siihen, että juuttuneen läppäventtiilin runkoa olisi lämmitetty liekillä ennen avausta. Tällöin venttiilin osien alkulämpötila olisi ollut korkeampi ja syttyminen kitkalämmön vaikutuksesta todennäköisempää. Alkulämmityksen merkitys on suurin nopeasti jäähtyvien lämmönlähteiden tai alueiden tapauksessa.

3.2 ADIABAATTINEN PURISTUS

Hapen kuumeneminen adiabaattisen puristuksen seurauksena on yleinen putkistopalojen syy erityisesti pulloihin liitetyillä pieniläpimittaisilla putkistoilla. Tämän vuoksi putkistojen käyttöohjeisiin sisältyy ohje, että sulkuventtiilit tulee avata hitaasti, jotta putkistot paineistuvat niin hitaasti, että hapen kokoonpuristumisesta syntyvä lämpö ehtii siirtyä metallikomponentteihin. Putkistoihin liitetyt PTFE-letkut syttyvät silti helposti, koska materiaali johtaa huonosti lämpöä (Barthelemy & Vagnard 1988).

Liitteessä 1 on esitetty kaavat, joilla hapen lämpötilan adiabaattinen nousu sen puristuksessa voidaan laskea. Jos esimerkiksi hapen alkulämpötila on 27 °C (300 K) ja se puristuu adiabaattisesti ilmakehän paineesta 34 baarin ylipaineeseen, loppulämpötila on 555 °C (828 K). Lämpäventtiilin avaamisen yhteydessä happi pääsi virtaamaan seuraavaan, noin 22 m pitkään putkijaksoon, jossa oli ilmaa ilmakehän paineessa. Tällöin suljettuna olleeseen putkijaksoon muodostuneet kaasun lämpötilat riippuivat siitä, missä määrin putkessa ollut ilma ja putkeen virtaava happi sekoittuivat toisiinsa virtauksen vaikutuksesta.

Muodostuvan seoksen loppulämpötila on helppo laskea kahdessa idealisoidussa tapauksessa. Täytettävän putkijakson tilavuus on niin pieni, että paine tasoittuu koko putkessa puristetun hapen varastosäiliön oletettuun ylipaineeseen 34 bar.

- a) *Jatkuva sekoittuminen.* Tuleva happi sekoittuu jatkuvasti putkessa olevaan ilmaan. Jos hapen alkulämpötila on 27 °C (300 K), seoksen loppulämpötila on 142 °C (415 K).
- b) *Osittainen sekoittuminen.* Tuleva happi työntää männän tavoin edellään putkessa olevaa ilmaa, joka puristuu putken suljettuun päähän. Tuleva happi sekoittuu itsensä kanssa. Putken päässä olevan ilman loppulämpötila on 555 °C (828 K). Hapen loppulämpötila muualla putkessa on hieman alempi kuin 142 °C (415 K).

Jälkimmäinen esimerkki selittää, miksi PTFE-letkujen havaittiin kokeissa aina syttyvän suljetun päänsä läheltä (Barthelemy & Vagnard 1988). On huomattava, että puristunut ilma muodostaa putken suljettuun päähän tulpan, jonka pituus näillä oletuksilla on noin 8 % putken pituudesta eli 1,8 m. Tällä alueella ilman lämpötila saavuttaisi orgaanisten aineiden mm. PTFE:n syttymislämpötilan. Putken muulla osalla (92 % eli 20,2 m) seoksen lämpötila olisi alle 142 °C, mikä ei riitä sytyttämään mitään eristemateriaalia tai epäpuhtautta, kuten voiteluöljyä. Koska syttyminen ei tapahtunut putkijakson suljetussa päässä vaan avatun sulkuventtiilin luona, päätellään että se ei voinut johtua hapen adiabaattisesta puristuksesta.

Liitteessä 1 on myös laskettu läpän aukossa virtaavan hapen lämpötilan käyttäytymistä. Happi virtaa raossa lämpötilastaan riippuvalla äänen nopeudella. Jos hapen ylipaine säiliössä on 34 bar ja lämpötila 27 °C (300 K), ylipaine raossa on 21,2 bar ja lämpötila (ideaalikaasuoletuksella) -23 °C (250 K). Kun hapen ominaisuuksien poikkeaminen ideaalikaasun ominaisuuksista otetaan huomioon, lämpötilaksi aukossa saadaan -25,5

°C. Hapen tiheys raossa on $28,5 \text{ kg/m}^3$ ja suurin virtausnopeus 300 m/s . Raon jälkeen hapen lämpötila virtauksessa palautuu suunnilleen alkuarvoonsa säiliössä.

3.3 HIUKKASTEN TÖRMÄYS

Happivirtauksen mukanaan kuljettamien hiukkasten törmäminen metallikomponentteihin on yleinen sattuneiden putkistopalojen syy. Esimerkiksi 90 % hapen siirtoputkien (pituus 1...500 km) paloista on päätelty aiheutuneen hiukkasten törmäyksistä. Hiukkaset syttyvät palamaan ja voivat välittömästi sytyttää teräksisen rakenneosan (Fano, Faupin & Barthelemy 2000). Metallihiukkasten itsesyttymislämpötila on satoja asteita metallikappaleen itsesyttymislämpötilaa alempi, koska hiukkasten pinta-alan suhde niiden tilavuuteen on erittäin suuri. White ja Ward (1966) antavat rautajauheen itsesyttymislämpötilalle hapessa arvon noin $325 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (600 K). Metallin itsesyttymislämpötilan määrittäminen on kuitenkin erittäin vaikeaa ja tulos riippuu suuresti jauheen ominaisuuksista, koejärjestelyistä ja myös satunnaistekijöistä (Schmitt 1996).

Välillisessä syttymisessä hehkuvat hiukkaset sytyttävät ensin tiivisteen tai ohuen metalliosan, joka puolestaan sytyttää paksun metalliosan (syttymisketju). Kriittisiä kohtia ovat venttiilit, joiden suunnitteluun ja materiaalivalintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota (Fano, Faupin & Barthelemy 2000). Erityisesti läppäventtiili muodostaa virtausesteen myös auki ollessaan. Kun hapen virtaus muuttaa suuntaansa läpän kohdassaan, virtauksen mukanaan kuljettamat hiukkaset jatkavat suoraan ja törmäävät läppään (Stoltzfus, Dees & Poe 1996).

Wegener (1964) tutki hiukkasten ja putken seinämän syttymistä suorassa putkessa sekä putkistossa, jossa suoraan putkeen on liitetty hitsaamalla kahdesta tai neljästä 90° :n käyrästä koottu mutkitteleva putki. Hapen virtausnopeutta putkistossa säädeltiin kuristuslevyllä. Hapen virtaukseen sekoitettiin erilaisia hiukkasia. Kokeista havaittiin hapen virtausnopeuden kasvaessa seuraavat ilmiöt:

1. Hiukkaset syttyvät mutkittelevassa putkessa, mutta eivät sytytä putkea.
2. Hiukkaset syttyvät suorassa putkessa, mutta eivät sytytä putkea.
3. Hiukkaset sytyttävät mutkittelevan putken palamaan.

Suora putki ei syttynyt palamaan yhdessäkään kokeessa. Wegener (1964) päätelee, että happivirtauksen kuljettamat metallihiukkaset voivat syttyä törmäyksissä putken seinämään, jos niissä on mukana hapettumatonta metallia ja niiden nopeus on tarpeeksi suuri. Koetuloksista ei kuitenkaan voinut päätellä, mikä törmäysnopeuden tulee vähintään olla, jotta hiukkaset syttyvät ja sytyttävät putken palamaan.

Hiukkasten syttyminen suorassa putkessa johtui siitä, että hiukkaset kulkeutuivat turbulenttisen virtauksen mukana ja niiden nopeudella oli tästä syystä satunnaisesti vaihteleva poikittaishiukkomponentti. Hiukkaset törmäsivät putken seinämään vinossa kulmassa. Toisaalta mutkittelevassa putkessa hiukkaset törmäsivät käyrän seinämään lähes kohtisuorassa kulmassa. Jos pienintä hapen virtausnopeutta, jolla hiukkaset syttyivät mut-

kittelevassa putkessa, merkitään v_1 :llä, niin syttymiseen suorassa putkessa vaadittiin virtausnopeus, joka oli 2...3 kertaa v_1 (todettu hitsauskuona- ja koksihiukkasilla). Vastaavasti virtausnopeus, jolla mutkitteleva putki syttyi palamaan, oli 2...4,5 kertaa v_1 (todettu koksi-, rauta- ja valssaushilsehiukkasilla).

Williams, Benz ja McIlroy (1988) ovat tutkineet teräslevyjen syttymistä hapessa, kun niihin törmää rautahiukkasia. Kokeissa käytettiin rautahiukkasia, joiden halkaisija oli 50...150 μm , sekä hiekanjyviä, joiden halkaisija oli 150...800 μm . Happivirtauksen nopeutta säädeltiin kuristuslevyllä 15...61 m/s. Virtaukseen sekoitettiin hiukkasseos, jossa oli 2 g rautahiukkasia ja 3 g hiekanjyviä. Hiukkassuihku kohdistettiin keskelle pyöreää teräslevyä, jonka reunalla oli rivi aukkoja happivirtausta varten. Ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistettu levy syttyi, kun virtauksen nopeus oli 51 m/s, mutta ei syttynyt nopeudella 38 m/s. Kaikissa tapauksissa levyn syttymisen edellytyksenä oli siihen törmänneiden rautahiukkasten syttyminen. Yhdessäkään kokeessa, joissa levy ei syttynyt, koekammioista poistuvassa kaasuvirtauksessa ei havaittu palavia hiukkasia.

Koejärjestelyllä voitiin hiukkasten törmäyskulma kohtioon pitää lähes kohtisuorana, jolloin törmäyskulman satunnaisuus ei haitannut kokeiden tulkintaa. Koska tämänkin jälkeen syttymiseen liittyy huonosti tunnettuja satunnaistekijöitä, suhteellisen pienillä virtausnopeuksilla tehtiin paljon kokeita. Esimerkiksi ruostumattomalla teräksellä AISI 316 tehtiin yhteensä 43 koetta virtausnopeuksilla 15...38 m/s. Nopeuksilla, joilla kohtio syttyi, ei ollut tarvetta tehdä enempää kokeita. Niinpä virtausnopeudella 51 m/s tehtiin kaksi koetta (joista toisessa kohtio syttyi) ja nopeudella 54 m/s vain yksi koe.

Hiukkasten syttymismekanisminä niiden törmätessä metallipintaan on päätelty liike-energian muuttuminen törmäyksessä lämmöksi. Koska hiukkasen palamislämpö on kaksi kertalukua suurempi kuin sen liike-energia, vasta hiukkasen palaminen sytyttää metallipinnan. Lisäksi tuoreen metallipinnan paljastuminen törmäyksessä voi edesauttaa syttymistä (Benz, Williams & Armstrong 1986). Inertit hiukkaset, kuten kokeessa käytetyt hiekanjyvät, eivät siis voi sytyttää metallia, mutta voivat kuitenkin edesauttaa syttymistä paljastamalla tuoreen metallipinnan.

Ilmeisesti törmäyskulman vaikutusta hiukkasten ja kohtion syttymiseen ei ole erikseen tutkittu. Wegenerin (1964) kokeista voidaan kuitenkin päätellä, että hiukkasten syttyminen vinossa törmäyksessä edellyttää suurempaa nopeutta kuin kohtisuorassa törmäyksessä. Gunaji ym. (1995) suosittelevat, että venttiilien pinnat, joihin hapen virtaus törmää, suunnitellaan viistoiksi, jotta mahdollisimman pieni osa virtauksen kuljettamien hiukkasten liike-energiasta muuttuisi törmäyksessä lämmöksi. Tällöin hiukkasten syttyminen törmäyksessä tulee epätodennäköiseksi. EIGA (2002) toteaa, että hiukkastörmäyksiä esiintyy putkiston kohdissa, joissa virtaus muuttaa äkillisesti suuntaansa tai virtauksen pyörteet saavat hiukkaset törmäämään putkiston seinämiin. Esimerkkinä jälkimmäisestä on paineenalennusventtiilin jälkeinen turbulenttinen virtaus.

Happiputkistojen eristemateriaalit eivät syty hiukkasten törmäyksestä läheskään niin helposti kuin metallit. Tämä johtuu ilmeisesti polymeerien elastisuudesta. Kun alumiinikuulien annettiin törmätä ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistettuun kohtioon, se syttyi, mutta PTFE:stä valmistettua kohtiota ei saatu syttymään (Forsyth, Gallus & Stoltzfus 2000).

Tornion happiputkisto oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, josta ei muodostu metallipölyä niin kuin hiiliteräksestä. Putkea puhdistettaessa todettiin kuitenkin, että putkeen oli asennuksen yhteydessä päässyt erilaisia epäpuhtauksia. Kun sulkuventtiili raottui, putken vaakasuoran osan pohjalle sekä sulkuventtiilin läpän päälle laskeutunut pöly lähti liikkeelle happivirtauksen mukana.

Liitteessä 1 todetaan, että hapen virtausnopeus kiihtyi paikalliseen äänen nopeuteen 300 m/s läpän ja venttiilirungon raossa. Kohdassa, jossa läppä oli avautunut alavirtaan, muodostui jopa 25 mm pitkä suutin (liitteen 1 kuva 11), jonka laajenevalla osalla virtausnopeus saattoi nousta jopa arvoon 450 m/s. Tässä tapauksessa happisuihku törmäsi noin 20°:n kulmassa venttiilin runkoon. Kohdassa, jossa läppä oli avautunut ylävirtaan, ei muodostunut yhtä selvää suutinta (Rahkan (2004) kuva 4), mutta hapen virtausnopeus saattoi nousta melko suureksi ennen metallitiivistettä.

Liitteessä 1 on laskettu matka, jolla ekvivalentilta halkaisijaltaan 100 µm:n teräshiukkanen saavuttaa raon happivirtauksessa tietyn nopeuden. Virtauksen keskinopeudelle on käytetty arvoa 200 m/s, kun nopeuden todennäköinen maksimiarvo raossa oli siis 300...450 m/s. Nopeus 50 m/s saavutetaan alle 5 mm:n matkalla ja nopeus 100 m/s ylitetään jo 28 mm:n matkalla. Edellytykset teräksen syttymiselle hiukkastörmäyksen seurauksena ovat siis olemassa.

Jos venttiililautasen päälle oli kertynyt metallihiukkasia, ne tempautuivat mukaan hapen virtaukseen heti kun lautasen ja tiivisteen väliin muodostui rako. Hiukkaset olisivat törmänneet venttiilin runkoon alavirran puolella noin 20°:n kulmassa. Tämä kulma on melko pieni, joten hiukkasten syttyminen olisi ollut epätodennäköisempää kuin kohtisuorassa törmäyksessä. Toisaalta hiukkasten törmäysnopeus olisi ollut huomattavasti suurempi kuin kohtisuorassa törmäyksessä kohtion syttymiseen riittänyt nopeus 50 m/s.

Metallihiukkasia oli mahdollisesti myös happilinjan vaakasuoran osuuden pohjalla. Kun venttiili avautui, hapen virtausnopeus linjan vaakasuorassa osassa oli vain noin 1 m/s. Kuitenkin jo näin pienellä nopeudella virtauspyörteet voivat irrottaa hiukkasia putken pinnalta. Tällöin hiukkaset olisivat voineet törmätä venttiilin metallitiivisteeseen ylävirran puolella. Metallitiivisteiden läpän puoleiseen pintaan hiukkaset olisivat törmänneet hyvin loivassa kulmassa. Sen sijaan metallitiivisteiden sisäpintaan hiukkaset olisivat törmänneet suunnilleen kohtisuorassa kulmassa. Kummassakin tapauksessa hiukkasten törmäysnopeus olisi ollut suuri.

3.4 KEMIALLINEN REAKTIO

Onnettomuuspaikalta löytynyt hitsauspoltin viittaa siihen, että läppäventtiilin runkoa oli lämmitetty liekillä venttiilin avauksen helpottamiseksi. Ellei runkoa lämmitetty aivan huolimattomasti, palon syttymiseen tarvittiin lisäksi jokin muu lämmönlähde. Kuten edellä todettiin, syttyminen kitkalämmön vaikutuksesta on todennäköisempää, jos venttiilin runkoa oli lämmitetty ennen avaamista.

Toinen mahdollisuus oli, että venttiiliin tai sen laippaan oli syntynyt pieni happivuoto. Jos hitsausliekin kuumien osien osui metalliin vuotokohdan lähellä, teräs syttyi palamaan.

Koska teräs palaa sulana, palavan pinnan lämpötila on teräksen sulamislämpötilassa. Tällöin lämmönjohtuminen venttiilin rungon lävitse olisi sytyttänyt ensin läpän PTFE-tiivisteeseen ja tämä edelleen läpän ja venttiilin rungon.

3.5 VIRTAUKSEN AIHEUTTAMA MEKAANISEN KOMPONENTIN VÄRÄHTELY

Lähteessä (Stoltzfus, Dees & Poe 1996) esitetään happiputkiston mahdolliseksi sytty-missyiksi virtauksessa värähtelevän polymeerikomponentin kuumeneminen materiaalin sisäisen kitkan vaikutuksesta. Tällaista komponenttia ei Tornion sulkuventtiilissä ollut. Eri asia on metallitiivisteiden mahdollinen värähtely venttiililäpän rakoon syntyvässä ha-pen turbulenttisessa virtauksessa ja kuumeneminen hankauskitkan vaikutuksesta. Vä-rähtelevän metallitiivisteiden kuumenemista tutkittiin Torniossa toukokuussa 2004 pai-neilmalla suoritetuissa puhalluskokeissa, joista tuloksena on saatu mm. lämpötilan ajal-linen käyttäytyminen mittauspisteissä. Tiivisteiden todettiin värähtelevän, mutta sen läm-pötila nousi vain muutamia asteita puhalluksen alussa. Korkein mitattu lämpötila oli 30 °C. Tämän jälkeen tiivisteiden lämpötila laski ilmavirtauksen vaikutuksesta (Nieminen 2004).

4 TUNNISTETUT SYTTYMISSYYT

Liitteessä 1 suoritettujen tarkastelujen perusteella voitiin siis hapen adiabaattinen puristumi-nen sulkea pois, koska se olisi voinut sytyttää vain putken suljetussa päässä olleen eris-teen tai epäpuhtauden, mutta ei avattavaa venttiiliä. Muita syitä ei voitu sulkea pois. Lisäksi syttymisellä saattoi olla useampi kuin yksi syy ja syttymisketjun muodostumi-nen on todennäköistä. Seuraavassa esitetään muutamia kuviteltuja tapahtumaketjuja, jotka olisivat voineet johtaa venttiilin syttymiseen.

1. Todennäköisin syttymissy on kiinni juuttuneen venttiilin äkilliseen irtoamiseen liittyvä kitkakuuminen (tai kipinäinti) kohdassa, jossa kahden metallipinnan vä-lillä oli suuri pintapaine tai aikaisemmin syntynyt tartunta. Kuumentunut teräs sytytti PTFE-tiivisteeseen ja sen hehkupalo edelleen venttiilin läpän, rungon tai mo-lemmat.
 - a) Suoritettujen venttiilien avauskokeiden sekä auki leikatusta venttiilistä tehty-jen havaintojen perusteella todennäköisin kuumenemiskohta oli läpän vapaan (toisio)karan laakerin reunapuristusalueelle, PTFE-pinnoitteen vaurion luokse syntynyt tartunta. Kun kiinni juuttunutta venttiiliä avattiin putkipihdeillä, kara kiertyi tartuntakohdan ympäri. Kun kara sitten irtosi, varastoitunut työ pur-kautui äkillisesti ja hankauskitka kuumensi pienen alueen tartuntakohdassa.
 - b) Toinen mahdollinen kuumenemiskohta on itse läpän juuttuminen joko laakeri-runkoon tai metallitiivisteeseen tavalla, jota ei ole pystytty päättelyllä tunnis-tamaan. Tällaisen juuttumisen olisi myös voinut aiheuttaa venttiilin läpän ja rungon väliin kiilautunut vieras esine.

2. Kun avautuneen läpän ja tiivisteiden väliin muodostuivat raot sekä ylävirran että alavirran puolelle, hapen virtaus tempasi metallihiukkasia mukaansa ja niitä törmäsi teräspintoihin luokkaa 100 m/s olevalla nopeudella. Törmäyksen kohde syttyi palamaan sytyttäen tiivisteet ja läpän. Mahdollisia törmäyskohtia on kaksi:
 - a) Ylävirran puolella hiukkasia törmäsi metallitiivisteeseen, joka sytytti PTFE-tiivisteiden ja edelleen venttiilin rungon sekä läpän.
 - b) Alavirran puolella hiukkasia törmäsi venttiilin runkoon, joka sytytti läpän. Lämmönjohtuminen rungossa sytytti PTFE- ja metallitiivisteiden.
3. Juuttuneen läppäventtiilin runkoa lämmitettiin hitsauspolttimen liekillä. Mahdollisia tapahtumaketjuja ovat:
 - a) Venttiiliä avattaessa putkipihdeillä hankauskitka kuumensi pienen alueen metallissa (katso kohta 1b). Alkukuumennus ja kitkalämpö kuumensivat teräksen, teräs sytytti viereisen orgaanisen materiaalin (PTFE ja mahdollinen lika) ja se edelleen venttiilin läpän, rungon tai molemmat.
 - b) Venttiiliin tai sen laippaliitokseen oli syntynyt pieni happivuoto. Kun hitsausliekin kuumin osa osui sen vieressä metalliin, metalli syttyi palamaan. Palon leviämistä mahdollisesti nopeutti läpän PTFE-tiivisteiden syttyminen.

LÄHDELUETTELO

Babrauskas, V. 2003. Ignition handbook. Issaquah, WA: Fire Science Publishers. Pp. 507–509. ISBN 0-9728111-3-3.

Barthelemy, H. & Vagnard, G. 1988. Ignition of PTFE-lined hoses in high-pressure oxygen systems: test results and considerations for safe design and use. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 289–304. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Bates, C. E., Wren, J. E., Monroe, R., Pears, C. D. 1979. Ignition and combustion of ferrous metals in high pressure, high velocity, gaseous oxygen. Journal of Materials for Energy Systems, vol. 1, no. 1, s. 61–76. ISSN 0162-9719.

Benz, F. J. & Stoltzfus, J. M. 1986. Ignition of metals and alloys in gaseous oxygen by frictional heating. Teoksessa: Benning, M. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 2. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 38–58. (ASTM Special Technical Publication 910). ISSN 0066-0558.

Benz, F. J., Williams, R. E. & Armstrong, D. 1986. Ignition of metals and alloys by high-velocity particles. Teoksessa: Benning, M. A. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 2. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 16–37. (ASTM Special Technical Publication 910). ISSN 0066-0558.

Bolobov, V. I., Berezin, A. Yu., Drozhzin, P. F. & Shteinberg, A. S. 1991. Ignition of compact stainless steel specimens in high pressure oxygen. Combustion, Explosion and Shock Waves, vol. 27, no. 3, s. 263–266. ISSN 0010-5082.

Bryan, C. J., Hirsch, D. B., Haas, J. & Beeson, H. D. 2000. Ignitability in air, gaseous oxygen, and oxygen-enriched environments of polymers used in breathing-air devices, final report. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 87–100. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

EIGA 2002. Oxygen pipeline systems. Brussels: European Industrial Gases Association. 71 s. (IGC Doc 13/02/E)

Fano, E., Faunin, A. & Barthelemy, H. 2000. Selection of metals for oxygen valves. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 38–56. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Forsyth, E. T., Gallus, T. D. & Stoltzfus, J. M. 2000. Ignition resistance of polymeric materials to particle impact in high-pressure oxygen. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 101–116. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Gunaji, M. V., Dobbin, D., Stoltzfus, J. & Beeson, H. 1985. Design of high pressure oxygen systems – practical suggestions. High Pressure Technology, ASME Pressure Vessels and Piping Division, vol. 297, s. 21–28. ISSN 0277-027X.

Kubinski, L. 2003. Fighting fire with fire. Standardization News, vol. 31, no. 7, s. 42–45. ISSN 1094-4656.

Lautkaski, R. 2003. Happiputkistojen syttymissyyt. Espoo: VTT Prosessit. 38 s. (Tutkimusselostus PRO3/1031/03, 19.12.2003.)

McQuaid, R. W., Sheets, D. G. & Bieberich, M. J. 1983. Determination of autogenous ignition temperatures of a steam turbine lubricating oil in nitrogen and oxygen mixtures. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 43–55. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Nieminen, V. 2004. Happilinjan pääsulkuventtiilin virtauskokeet. Luonnos. Espoo: VTT Tuotteet ja tuotanto. 33 s. (Tutkimusraportti TUO57-044604.)

Rahka, K. 2004. Tornion happiputkiston pääsulkuventtiilin räjähdysenomainen palaminen 19.9.2003. Venttiilin ja putkiston tutkimukset. Espoo: VTT Tuotteet ja tuotanto. 24 s. (Tutkimusraportti TUO57-045043)

Schmitt, C. R. 1996. Pyrophoric materials handbook. Chapter 3.
<http://towson.edu/~schmitt/pyro/chapter3.html>

Shelley, R. M., Wilson, D. B. & Beeson, H. 1997. Combustion characteristics of polymers as ignition promoters. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 223–238. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.

Stoltzfus, J. M., Dees, J. & Poe, R. F. 1996. Guide for oxygen hazards analyses for components and systems. Linthicum Heights, MD: NASA Center for AeroSpace Information. vii + 7 s. (NASA Technical Memorandum 104823).

Stoltzfus, J. M. & Lowery, F. 1995. Overview of the oxygen system safety problem and its solution. Teoksessa: Proceedings, 2nd International Conference on Heat-Resistant Materials, Gatlingburg, Tn, 11–14 September, 1995. s. 621–628. ISBN 0-87170-539-7.

Wegener, W. 1964. Untersuchungen über die sicherheitstechnisch zulässige Strömungsgeschwindigkeit von Sauerstoff in Stahlrohrleitungen. Stahl und Eisen, vol. 84, no. 8, s. 469–475.

White, E. L. & Ward, J. J. 1966. Ignition of metals in oxygen. Columbus, OH: Battelle Memorial Institute. (Report DMIC-224.) 55 s. [referoitu lähteessä Fano, E., Faunin, A. & Barthelemy, H. (2000)].

Williams, R. E., Benz, F. J. & McIlroy, K. 1988. Ignition of steel alloys by impact of low-velocity iron/inert particles in gaseous oxygen. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 72–84. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Liite tutkimuslaskelmaan TORNION VENTTIILIPALON TODENNÄKÖISET
SYTTYMISSYYT (R. Lautkaski)

HAPPIPUTKISTON VENTTIILIONNETTOMUUTEEN LIITTYVÄÄ TEKNISTÄ TERMODYNAMIikkaa

1. JOHDANTO

Puhtaan happikaasun käyttöön teknisissä järjestelmissä liittyy varsin suuria potentiaalisia riskejä hapen tunnetusti korkean kemiallisen aktiivisuuden takia. Todisteena tästä on harvakseltaan, mutta yleisesti sattuvat onnettomuudet kaasunvalmistuksessa, lääketieteellisissä soveluksissa, avaruustekniikassa sekä, erityisesti happimellotuksen yleistymisen myötä, raskaassa metalliteollisuudessa.

Happiputkistoja koskevat turvamääräykset ja ohjeet ovat pitkällisen kokemuksen myötä muodostuneet varsin kattaviksi. Silti niitä on viimeaikoina ryhdytty edelleen kehittämään erityisesti avaruustekniikan ja metallurgian aloilla sattuneiden, ihmishenkiä vaatineiden tai taloudellisesti mittavien onnettomuuksien takia. Hitsaustekniikassa sekä siihen liittyvässä kaasun valmistuksessa ja jakelussa on päästy ilahduttavan korkeaan turvallisuustasoon.

Seuraavassa käydään ensin läpi sellaisia po. aiheeseen liittyviä teknisen termodynamiikan perusasioita ja ilmiöitä, joiden tiedostaminen katsotaan hyödylliseksi onnettomuustilanteita tai turvallisuustekijöitä pohdittaessa. Lisäksi lasketaan kohteena olevaan jaloterästehtaalla sattuneeseen onnettomuuteen liittyviä karakteristisiä termodynaamisia arvoja ja selvitetään laskennallisesti eri tapahtumavaihtoehtojen mahdollisuuksia. Onnettomuudessa hapen NS300-putkilinjassa ollut sulkuventtiili ja sitä virtaussuunnassa seuranneet putkenosat syttyivät ja paloivat.

Teksti pyritään tekemään muotoon, jossa se palvelisi myös sellaista lukijaa, jolle tekninen termodynamiikka ei ole tuttua tai ei ole enää tuoreessa muistissa.

Selostuksessa käytetyt tapauskohtaiset tekniset tiedot perustuvat onnettomuustutkijoiden välittämään aineistoon, sekä itse palaneen läppäventtiilin osalta erityisesti lähteeseen /1/. Jotkut arvot ovat tutkinnan aikana mahdollisesti hieman tarkentuneet. Vähäisimpiä muutoksia ei ole otettu huomioon, sen sijaan luonnoksessa esiintynyt liian lyhyt suljetun putkenosan pituus on tässä versiossa korjattu oikeampaan arvoon eli 22 m:iin.

2. KAASUN PAISUNTA JA PURISTUS

Ideaalikaasun adiabaattisessa (lämpöeristetyssä) paisunnassa tai puristuksessa vallitsee paineen p , absoluuttisen lämpötilan T ja tilavuuden V välillä yhteys

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/C_{pm}} = \left(\frac{V_1}{V} \right)^{1/C_{vm}} \quad (1)$$

joista kaksi viimeistä voidaan esittää myös muodossa $pV^\gamma = \text{vakio}$. Edellä C_{pm} on molaarisen lämpökapasiteetti vakio paineessa (paljas luku), $C_{vm} = C_{pm} - 1$ molaarinen lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa sekä $\gamma = C_{pm} / C_{vm}$ edellisten suhde, joka ideaalikaasulle on yhtä suuri kuin ns. isentrooppieksponentti. Hapelle, kuten kaikille kaksiatomisille kaasuille, $C_{pm} = 3,5$ ja $C_{vm} = 2,5$, jolloin vastaavasti isentrooppieksponentiksi muodostuu $\gamma = 1,40$.

Hapen, tai yleensä kaksiatomisen kaasun, paisuessa tai puristuessa isentrooppisesti (= palautuvasti ilman lämmönsiirtoa) saadaan siis em. suureiden välisten yhteyksien laskukaavoiksi

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{0,286} \quad \text{tai} \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V} \right)^{0,400} \quad \text{sekä} \quad \frac{p}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V} \right)^{1,40} \quad (2)$$

Esimerkiksi jos kaasu puristuu 1,0 baarin paineesta 35 baariin, niin absoluuttisten lämpötilojen suhteeksi muodostuu ensimmäisen kaavan perusteella 2,76 eli lähtölämpötilan ollessa 300 K saadaan lopputilan lämpötilaksi 829 K (556 °C). Tilavuussuhdetta V_1/V nimitetään polttomoottoritekniikassa myös puristussuhteeksi. Jos esimerkiksi dieselmoottorin puristussuhde on 15,0, niin painesuhteeksi (ilma on kaksiatomisten kaasujen seos) puristustahdin lopussa saadaan 44,3.

Jos systeemiin, siis tässä tapauksessa kaasuun, tuodaan lämpöä tai sitä johtuu pois, niin tulos poikkeaa edellä esitettyjen kaavojen arvoista ja laskenta mutkistuu. Samoin käy jos lämpökapasiteetit eivät ole vakioita, kuten reaalikaasuilla erityisesti korkeammissa lämpötiloissa.

Suureiden välillä pätee kaasuille lisäksi aina myös tilanyhtälö, joka voidaan kirjoittaa esim. seuraaviin muotoihin

$$pv = \Omega \frac{RT}{M} \quad \text{tai} \quad \frac{p}{\rho} = \Omega \frac{RT}{M} \quad (\text{ideaalihakelle } \frac{p}{\rho} = 259,8 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{T}{\text{K}}) \quad (3)$$

jossa v on ominaistilavuus (m^3/kg), sen käänteisarvo ρ tiheys (kg/m^3) sekä M kaasun molaarinen massa (hapelle 32,00 kg/kmol, typelle 28,01 kg/kmol ja ilmalle 28,96 kg/kmol). Kerroin R on yleinen kaasuvakio (yksikönmuunnoskerroin), jonka arvo on 8314 J/kmol K. Paineen p yhteensopiva yksikkö on Pa = N/m², lämpötilalla tarkoitetaan absoluuttista lämpötilaa: $T_K = t_C + 273,15$. Yhtälöön on täydellisyyden vuoksi merkitty oikealle puolelle myös reaalikaasukerroin Ω , jonka arvo ideaalikaasulle on aina 1,0 ja voidaan silloin jättää pois.

Tilanyhtälöstä voidaan tarvittaessa laskea po. aineelle mikä tahansa kolmas suureista p , v ja T , kun kaksi muuta tunnetaan.

Ilmalle ja sen pääosakaasuille pätee ideaalikaasuoletus käytännössä varsin hyvin n. 50 baariin saakka huoneenlämpötilasta aina 1000 °C yläpuolelle. Sensijaan lämpökapasiteetit alkavat muuttua selvästi jo 300...400 °C jälkeen. Jos ei erikseen mainita, pitäydytään tässä selkeysystistä ideaalikaasuoletuksen mukaiseen kaasuun.

3. KAASUN VIRTAUS SÄILIÖÖN

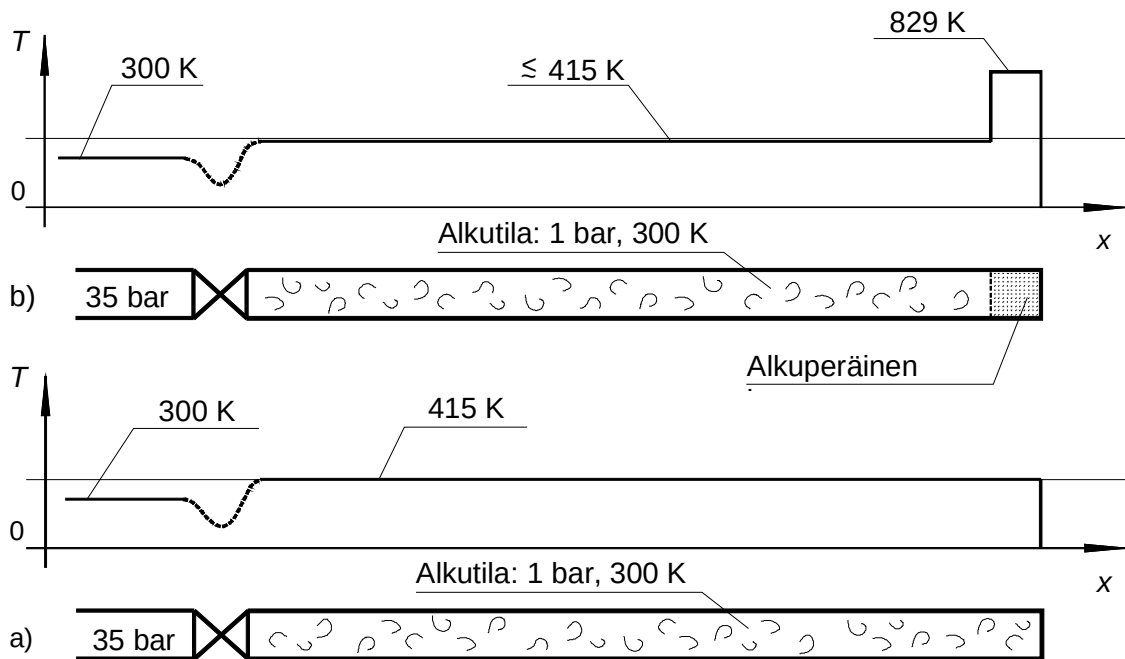
Kaasun virtauksessa säiliöön voidaan erottaa kaksi perustapausta, joissa maksimilämpötilat voivat erota huomattavastikin toisistaan.

3.1 Säiliön sisältö sekoittuu

Kun tarkastellaan ideaalikaasun virtausta ulkopuolelta sisään säiliöön, jossa tuleva kaasu sekoittuu välittömästi jo siellä olevaan kaasuun, saadaan sen yhtenäiselle lämpötilalle (sekoituslämpötilalle) T lauseke

$$\frac{T}{T_1} = \frac{\gamma}{1 + \frac{p_0}{p} \left(\gamma \frac{T_1}{T_0} - 1 \right)} \quad (4)$$

jossa alaindeksi 1 viittaa muuttumattomaan ympäristöön (esim. tarpeeksi suuri toinen säiliö) ja alaindeksi 0 alkutilaan itse säiliössä. Kaavasta nähdään, että mitä pienempi säiliön alkupaine on verrattuna loppupaineeseen sitä suurempi lämpötilojen suhde saavutetaan. Erityisesti jos alkupaine on nolla eli säiliössä on alkuhetkellä tyhjä, niin loppulämpötila on kaksiatomisella kaasulla $1,40 (= \gamma)$ -kertainen ympäristön lämpötilaan nähden. Esimerkiksi jos $T_1 = 300$ K, niin suurin saavutettava lämpötila kaasun virratessa tyhjiin säiliöön ja sekoittuessa on 420 K loppupaineesta riippumatta.



Kuva 1 Kaasun virtaus säiliöön. Loppulämpötilat säiliössä kahdessa idealisoidussa tapauksessa, kun alkutilat ja loppupaine ovat kummassakin samat. Tapauksessa a) tuleva kaasu sekoittuu jatkuvasti säiliössä jo olevaan kaasuun, tapauksessa b) kaasut pysyvät erillään, mutta tuleva sekoittuu itsensä kanssa.

3.2 Säiliön sisältö ainakin osittain sekoittumatta

Jos säiliö ei ole muodoltaan avara ja tasasuhtainen, niin osa säiliön sisällöstä saattaa jäädä sekoittumatta tulevaan kaasuun, jolloin se ainoastaan puristuu kokoon ja käyttäytyy kuten kuvassa 1b on esitetty. Sekoittumattomalle kaasulle tilanne on siis sama, jos esim. putkessa oleva mäntä puristaisi sitä kasaan.

Erityisesti näin voin käydä, jos säiliö on todellisuudessa pitkähkö suljettu putki tai putkihaara. Jos ympäristön (tulopuolen) paine on esim. 35 baaria ja suljetun putken 1 baari, niin sekoittumattoman osan lämpötila nousee lämpöeristetyssä tapauksessa 300 K:stä edellä laskettuun 829 K:iin. Samalla on huomattava, että puristuneen alkuperäisen kaasun tilavuuden suhde alkutilavuuteen on 0,079 (kaava 1) eli esimerkiksi 22 m pitkässä putkessa se muodostaa n. 1,7 m pitkän tulpan. Sisään virranneen uuden kaasun sekoituslämpötila on puolestaan hieman alempi kuin mitä täysin sekoittuneessa tapauksessa olisi.

Numeroarvojen hahmottamiseksi esitetään seuraavassa taulukossa säiliön maksimilämpötiloja loppupaineen funktiona kummassakin erikoistapauksessa. Säiliön alkutila on 1 bar ja 300 K. Ympäristön lämpötila 300 K.

p (bar)	T_s (K)	T_e (K)	p (bar)	T_s (K)	T_e (K)	p (bar)	T_s (K)	T_e (K)
1,0	300	300	10,0	404	580	100	418	1120
1,60	336	343	16,0	410	663	160	419	1280
2,5	362	390	25,0	413	753	250	419	1455
4,0	382	446	40,0	416	861	400	420	1664
6,3	395	508	63,0	417	981	630	420	1895

Taulukko 1: Säiliön maksimilämpötiloja eri loppupaineille kun alkutila on 1 bar ja 300 K. Lämpötilalla T_s viitataan säiliöön, jossa tuleva kaasu välittömästi sekoittuu siellä jo olevaan kaasuun. T_e on säiliössä olleen alkuperäisen, erottuneena pysyneen kaasun lämpötila. Jos prosessissa siirtyy lämpöä seinämiin, niin lämpötilat jäävät alhaisemmiksi.

Käytännössä lämmönsiirto vaikuttaa tulokseen enemmän tai vähemmän. Erityisesti korkeilla paineilla vaikuttavat lämmönsiirto ja osittainen sekoittuminen siten, että arvoja T_e ei välttämättä saavuteta. Silti lämpötilat voivat kohtuullisillakin paineilla saavuttaa arvoja, jotka helposti ylittävät esim. hiilivetyjen itsesyttymislämpötilat. Tarkasteltavassa tapauksessa korkeat lämpötilat syntyvät suljettuna olevan venttiilin läheisyyteen n. 22 m etäisyydelle läppäventtiilistä sekä mahdollisesti pienten sivulinjojen päihin.

Yleisesti ottaen prosessi lähenee lämpöeristettyä tapausta sitä enemmän, mitä nopeampi se on ja mitä suuremmassa tilavuudessa se tapahtuu. Jälkimmäinen seikka johtuu siitä, että mittojen suuretsa pinta-alat pienenevät suhteessa tilavuuteen. Pääinvastaisesti ohuissa putkissa ja raoissa jäähtyminen on nopeaa, mutta silti suurimmat, äkilliset paineen nousut saattavat niissäkin johtaa korkeaan lämpötilaan.

4. KAASUN YLEINEN VIRTAAUS

4.1 Virtauksen energiatase

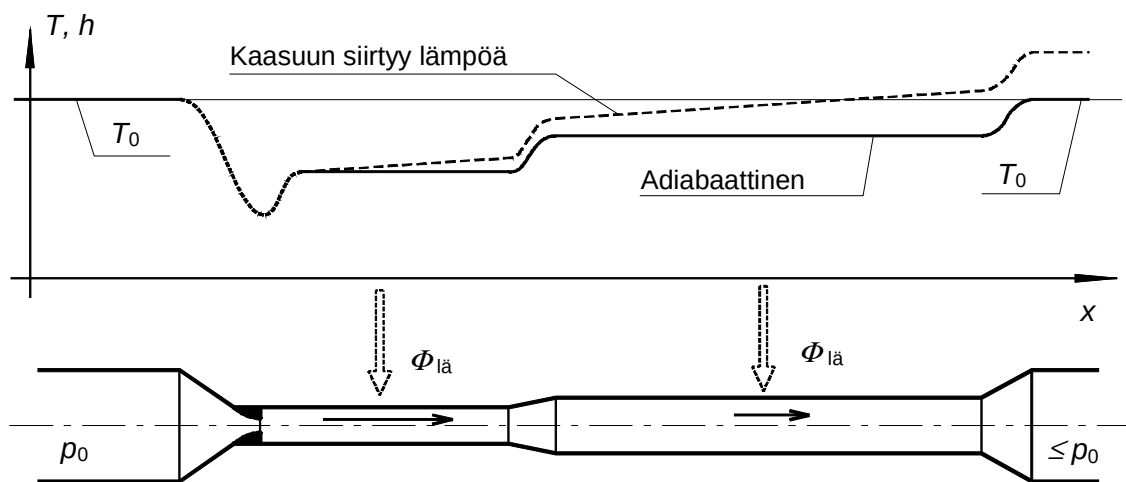
Kaikelle lämpöeristetylle eli adiabaattiselle virtaukselle (kitkalliselle tai kitkattomalle) putkessa pätee energiataseesta saatava yhteys (oletetaan, että korkeuspotentialilla ei ole kaasulla merkitystä)

$$\frac{w^2}{2} + h = \text{vakio} = h_0 \quad (\text{laajemmin: totaalinen entalpia } h_t = h + \frac{w^2}{2} + gz = \text{vakio}) \quad (5)$$

jossa w (m/s) on virtausnopeus ja h (J/kg = m²/s²) kaasun ominaisentalpia. Alaindeksi ₀ viittaa lepotilaan, esim. olosuhteisiin (lähtö)säiliössä. Ideaalikaasun entalpialle on voimassa $dh = c_p dT$ eli entalpia riippuu vain lämpötilasta. Tässä c_p on ominaislämpökapasiteetti (massan suhteen) vakioaineessa ($c_p = C_{pm} R/M$), joka on esim. ilmalle n. 1,005 kJ/kg K ja hapelle n. 0,909 kJ/kg K. Jos oletetaan kaasu ideaalikaasuksi ja kirjoitetaan edellinen yhtälö lämpötilaa käyttävään muotoon, saadaan esim. putkiston kahdelle eri kohdalle 1 ja 2:

$$c_p T_0 = c_p T_1 + \frac{w_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{w_2^2}{2} \quad (6)$$

Yhtälöstä havaitaan, että kun nopeus kasvaa (samalla paine pienenee) niin lämpötila laskee ja päinvastoin. Ilmiötä voidaan kuvata myös siten, että kun kaasu tekee paisuessaan työtä oman sisäenergiansa kustannuksella, niin työ menee sen oman ulkoisen energian (nopeuden) kasvattamiseen ja päinvastoin. Tulos on myös riippumaton siitä, muuttuuko tila juosteasti tai äkillisesti esim. paineiskussa. Samoin se pätee niin ääntä hitaamassa (alisoonisessa) kuin ääntä nopeamassa (ylisoonisessa) virtauksessa.



Kuva 2 Virtaavan kaasun lämpötilakäyttäytyminen. Katkoviiva esittää tapausta, jossa kaasuun johtuu putkistosta lämpöä (= kaasulle ulkoista lämpöä).

Jos erityisesti seurataan lepotilan (nopeus pieni) lämpötilasta eli säiliölämpötilasta T_0 lähtevää kaasua pitkin putkistoa, niin sen lämpötila saadaan kussakin putkiston kohdassa

$$T_1 = T_0 - \frac{w_1^2}{2c_p} \quad (7)$$

Havainnollisuuden vuoksi muutama lukuarvo lämpötilan laskulle, kun säiliöstä lähtee ilmaa saavuttaen eri nopeuksia: 10 m/s -> 0,05 K, 50 m/s -> 1,25 K, 100 m/s -> 5,0 K ja 300 m/s -> 45 K. Kohtuullisilla nopeuksilla lämpötilan muutos on siis mitätön, mutta kasvaa suuremmilla nopeasti.

Kun kaasu saapuu uudelleen kohtaan, jossa sen nopeus hidastuu merkityksettömän pieneksi, niin sen lämpötila on jälleen sama kuin lepotilassa. Tämä siis sillä edellytyksellä, että kaasuun ei tuoda sen ulkopuolelta energiaa, esim. lämpöä seinästä. Jos kaasuun kuitenkin siirtyy välillä 1 ja 2 lämpöteho Φ (W), niin kaava (6) muuntuu muotoon

$$c_p T_2 + \frac{w_2^2}{2} = c_p T_1 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{\Phi}{\dot{m}} \quad (8)$$

jossa $\dot{m}$ on kaasun massavirta (kg/s).

Kaasu voi pysähtyä myös virtauksessa olevan esteen etureunan patopisteeseen, jossa se adiabaattisessa virtauksessa on siis jälleen lepotilassa eli patolämpötila = säiliölämpötila. Jos virtaus on häviötöntä, niin myös muut patopistearvot ovat samat kuin säiliössä, häviöllisessä sen sijaan paine ja tiheys ovat pienemmät, mutta säiliölämpötila edelleen säilyy.

4.2 Kriittinen virtaus, ylisooninen virtaus

Jos kaasusäiliöstä on aukko ympäristöön ja ympäristön painetta alennetaan, niin kaasu alkaa luonnollisesti virrata aukosta ulos. Kun ulkoista painetta alennetaan lisää, virtaus kasvaa, mutta vain määrättyyn painesuhteeseen, ns. kriittiseen painesuhteeseen saakka. Jos painetta alennetaan edelleen, niin tila aukossa (aukon kriittisessä leikkauksessa) ja sen myötä nopeus ja massavirta eivät enää muutu. Kriittistä virtaustilaa kutsutaan myös Laval-tilaksi (alaindeksi L). Siinä ovat häviöttömässä tapauksessa kaikki muutkin suhteet yksikäsitteisesti määrättyt, ks. taulukko 2.

	C_{pm}	γ	p_L/p_0	ρ_L/ρ_0	T_L/T_0	c_L/c_0	$\Psi_{\max}$
Yksiatomiset kaasut	2,5	1,667	0,487	0,650	0,750	0,866	0,726
Kaksiatomiset kaasut (ilma, happi)	3,5	1,40	0,528	0,634	0,833	0,913	0,685
Vesihöyry	4,3	1,30	0,546	0,628	0,870	0,932	0,667
Hyvin suurimolekyyliset kaasut r.a.	∞	1,0	0,606	0,606	1,0	1,0	0,606

Taulukko 2 Laval-tilan arvoja isentrooppiselle virtaukselle.

Taulukossa c on äänen nopeus ja Ψ jäljempänä esitettävä funktio. Kriittisessä kohdassa virtausnopeus on Laval-tilan äänennopeuden suuruinen, joka on puolestaan lepotilan äänennopeutta pienempi lämpötilan laskun takia.

Taulukon suhteilla saadaan helposti lasketuksi esimerkiksi raollaan olevan läppäventtiilin kuristuskohdan arvot. Jos ylävirran puolella putkistossa on kaasun lämpötila 300 K ja paine 35 bar sekä alavirran paine 1 bar, niin painesuhde on pienempi kuin kriittinen suhde eli virtausraon kriittisessä kohdassa vallitsee tila (hapelle), jossa paine on $p_L = 0,634 \cdot 35 \text{ bar} = 22,2 \text{ bar}$, lämpötila $T_L = 0,833 \cdot 300 \text{ K} = 250 \text{ K} = -23 \text{ °C}$ (pudotus 50°C) ja tiheys $\rho_L = 0,634 \cdot 44,9 \text{ kg/m}^3 = 28,5 \text{ kg/m}^3$. Ideaalikaasulle äänen nopeus on $c = \sqrt{\gamma RT / M}$ eli 300 K:ssä hapelle $c_0 = 330 \text{ m/s}$, jolloin raossa vallitseva kriittisen virtauksen nopeus on $w_L = 0,913 \cdot 330 \text{ m/s} = 300 \text{ m/s}$.

Huomattakoon, että jos edellä mainittua asetelmaa muutetaan siten, että säiliön painetta kasvatetaan ja ulkopuolinen paine pysyy vakiona, niin suhteet pysyvät edelleen kriittisen painesuhteen alituksen jälkeen samana kuin taulukossa, mutta massavirta kasvaa koska kaasun tiheys ρ_0 kasvaa säiliössä paineen myötä.

Siinä tapauksessa, että virtausaukko muotoillaan kriittisen kohdan jälkeen juoheasti laajentuvaksi (kutsutaan tällöin myös Laval-suuttimeksi), voi nopeus nousta edelleen kriittistä arvoa suuremmaksi eli tulla ylisooniseksi, jolloin paine, lämpötila ja tiheys laskevat edelleen kriittisen pisteen arvoista. Massavirran suuruus ja kriittisen kohdan arvot eivät kuitenkaan muutu.

Jos putkeen, tai tässä tapauksessa raollaan olevan läppäventtiilin kuristuskohdan laajenevaan osaan, on muodostunut ylisooninen eli ääntä nopeampi virtaus, se voi palautua takaisin alisooneksi joko juoheasti uudelleen supistuvassa suuttimessa tai sitten äkillisesti shokkiaallossa. Kummassakin tapauksessa säiliölämpötila säilyy, kuten edellä jo todettiin. Käytännössä jäähtyneen nopean virtauksen rajakerroksen lämpötila saattaa kuitenkin hieman nousta, koska ainakin tapahtuman alussa seinämän lämpötila on korkeampi kuin jäähtyneen kaasun. Kun virtaukseen muodostuu shokkiaalto, niin rajakerroksen osalta lämpötila voi nousta hieman säiliölämpötilaa korkeammaksi. Nämä ja muut vastaavat rajakerrosilmiöt ovat kuitenkin näillä parametrialueilla varsin pieniä. Samoin venttiiliraon jälkeisen 'hallitsemattoman' paisunnan (noin kriittisestä paineesta säiliön paineeseen) seurauksena syntyvässä shokkiaaltoja sisältävässä virtauskentässä ei lämpötilojen odoteta juuri nousevan säiliölämpötilaa korkeammiksi.

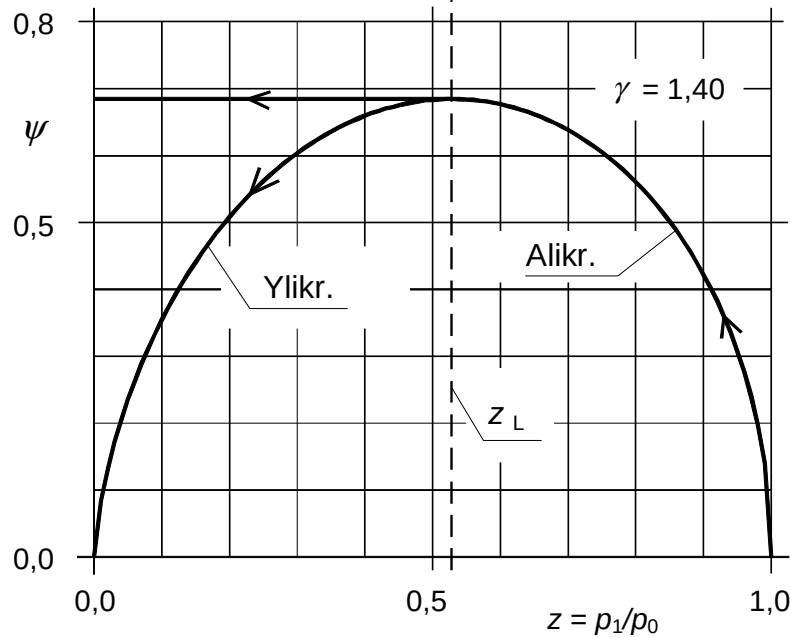
Kokoonpuristuvan kaasun massavirta ulos säiliöstä voidaan laskea mm. kaavasta

$$\dot{m} = \alpha A \Psi \sqrt{p_0 \rho_0} \quad (9)$$

jossa α on ns. suutinkerroin, A pinta-ala ja Ψ painesuhteen p_1/p_0 funktio, jonka arvo voidaan laskea (kaavoja mm. käsikirjoissa) tai sitten ottaa suoraan esim. kuvasta 3. Jos painesuhde $z = p_1/p_0$ (uudelleenlaajenevassa suuttimessa ahtaimman kohdan painesuhde, joka saattaa olla pienempi kuin suhde koko suuttimen yli) on suurempi kuin kriittinen painesuhde eli virtaus alisooneista, niin otetaan Ψ po. painesuhteen arvon mukaan. Jos kurkkuun syntyy kriittinen virtaus eli po. painesuhde kriittistä pienempi, niin massavirtaa laskettaessa $A = A_{\min}$ ja $\Psi = \Psi_{\max}$ riippumatta reunaehtopaineiden lopullisesta suuruudesta tai suuttimen loppupään muotoilusta.

Suutinkerroin on suppeumakertoimen μ ja ns. nopeuskertoimen ϕ tulo: $\alpha = \mu \phi$. Nopeuskertoimen ottaa huomioon ns. isentrooppisen hyötösuhteen η_s , joka pitkissä suuttimissa voi olla kitkan takia merkittäväkin, lyhyissä aukoissa taas $\phi \approx 1,0$ eli $\alpha \approx \mu$. Suppeumakerroin on teräväreunaisella lyhyelle aukolle n. 0,60, hyvin pyöristetylle suuttimelle 1,0. Jo nopeuskertoimta ei käytetä, pitäisi kaavassa (9) tarkkaan ottaen funktiota Ψ määritettäessä ottaa huomi-

oon paisuntaprosessin häviöllisyys. Tavanomaisessa laskennassa, kuten tässä, funktio määritellään isentrooppisena ja otetaan häviöiden vaikutus huomioon suutinkertoimessa (nopeuskertoimen osuus, $\varphi = \sqrt{\eta_s}$). Suutinkertoimen ja pinta-alan tulo αA voidaan monesti käytännön tehtävissä käsittää myös teholliseksi pinta-alaksi.



Kuva 3 Suutinvirtausfunktio ψ painesuhteen $z = p_1/p_0$ funktiona isentrooppisessa virtauksessa

Virtauksen nopeus missä tahansa suuttimen kohtaa, jossa painesuhde on z , voidaan laskea mm. kaavasta

$$w = \sqrt{2 C_{pm} \cdot p_0 / \rho_0 \cdot (1 - z^{1/C_{pm}})} \quad (10)$$

Jos hieman raollaan olevan läppäventtiilin molempien rakojen yhteinen pinta-ala ahtaimmalta kohdalta on 600 mm^2 ja oletetaan konservatiivisesti suutinkerroin 1,0:ksi, niin saadaan edellisen mukaan massavirraksi, kun ylävirran paine ja lämpötila ovat 35 bar ja 300 K

$$\dot{m} = 1,0 \cdot 0,600 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 0,685 \sqrt{35 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot 44,9 \text{ kg/m}^3} = 5,15 \text{ kg/s} \quad (11)$$

Todellisuudessa suutinkerroin asettunee kitkasta ja tiivisteen kulmikkuudesta johtuen arviolta johonkin 0,60 ja 0,80 väliin, jolloin massavirta on siis vastaavasti pienempi. Kriittinen nopeus kurkussa laskettiin jo edellä: 300 m/s.

Huomattakoon, että painesuhteen ollessa lähellä yhtä, $z \geq 0,940$ eli $Ma \leq 0,3$, voidaan myös kaasuille käyttää kokoonpuristumattoman virtauksen kaavaa

$$\dot{m} = \alpha A \sqrt{2 \rho_0 (p_0 - p_1)}$$

jolloin vältetään käyrästä epätarkan alueen soveltamisesta.

4.3 Kuristus, Joule-Thomson-ilmio

Kuristuksella tarkoitetaan teknisessä termodynamiikassa paineen alennusta nesteen virratessa ahtaan kohdan läpi ilman, että se tekee ulkoista työtä tai siihen tuodaan lämpötehoa. Prosessissa totaalinen entalpia, jos nopeudet ovat pieniä niin entalpiakin, säilyvät. Ideaalikaasulla myös kokonaislämpötila säilyy, mutta reaalikaasulla se voi hieman muuttua, jos lämpökapasiteetti ei ole vakio eli entalpia riippuu myös paineesta. Siis kuristuksessa $h = c_p T$ eli lämpökapasiteetin ja lämpötilan tulo säilyvät, mutta kumpikin tulon tekijä voi hieman muuttua siten, että ns. inversiolämpötilan (hapelle n. 1050 K) yläpuolella lämpötila nousee, alapuolella laskee.

Muutoksen suuruus ilmaistaan Joule-Thomson kertoimella $\mu_{JT} = (\partial T / \partial p)_h$, jonka arvo hapelle 273 K lämpötilassa on n. 0,25 K/bar eli kuristuksesta 35:stä 1 baariin reaalihapen lämpötila muuttuu $\Delta T \approx 0,25 \text{ K/bar} \cdot (-34 \text{ bar}) = -8,5 \text{ K}$. Ilmio on usein käytännössä, kuten puheena olevassa läppäventtiilitarkastelussa, melko merkityksetön muiden tekijöiden rinnalla.

Jos halutaan kuitenkin korjata likimääräisesti edellä laskettua kriittisen kohdan lämpötilaa reaalikaasulle, saadaan sille $T_{L, \text{korj}} = -23,3^\circ\text{C} + 0,25^\circ\text{C/bar} \cdot (22,2 - 35) \text{ bar} = -25,5^\circ\text{C}$.

5. SULJETTUNA OLLEEN PUTKISTONOSAN TÄYTTYMISAIKA

5.1 Täyttymisajan arvoja kun virtausaukko pysyy vakiona

Tarkasteltavan läppäventtiilin jälkeen putkisto jatkui pääosin sisähalkaisijaltaan 311 mm suurusena putkena 22 m matkan ennen seuraavaa suljettuna olevaa venttiiliä. Osuuden tilavuus on siten n. 1,67 m³. Taulukoon 3 on laskettu numeerisesti pu204-ohjelmalla /2/ suljetun osan täyttymisajat olettaen läppäventtiilin kokonaisvuotoraoille eri suuruisia tehollisen pinta-alan αA arvoja. Suurimpana aukkona taulukossa on 3 x 150 mm² /1/ paraabelisegmentin kaksinkertainen arvo eli 600 mm². Kuten edellä, otetaan ylävirran paineeksi 35 bar ja lämpötilaksi 300 K. Säiliön alkutilaksi vastaavasti 1 bar ja 300 K. Happi oletettu edelleen ideaalikaasuksi.

Säiliön täyttymisaika on lämpöeristetyille systeemille äärellinen, ts. paine ei lähene asymptoottisesti tulopuolen painetta vaan saavuttaa sen tietyssä ajankohtana. Käytännössä tässä vaiheessa voi esiintyä kaasutulpan hitaudesta johtuvaa pientä edestakaista heilahtelua, ja jos säiliön seinämiin johtuu lämpöä, niin aukkoon jää pieni jälkivirtaus kaasun jäähtymisen (useimmiten) takia. Tämä luonnollisesti jatkuu niin kauan, kunnes lämpötilan tasapaino saavutetaan.

$\alpha A \text{ (mm}^2\text{)}$	$t_{\text{tasaantumis}} \text{ (s)}$	$m_{\text{max}} \text{ (kg/s)}$	$\alpha A \text{ (mm}^2\text{)}$	$t_{\text{tasaantumis}} \text{ (s)}$	$m_{\text{max}} \text{ (kg/s)}$
25	308	0,21	250	31,5	2,15
40	194	0,34	315	24,5	2,70
100	77	0,86	600	12,9	5,15

Taulukko 3

Virtausaika suljetun 22 m pitkän putkenosan muodostamaan säiliöön raollaan olevasta läppäventtiilistä. Hapen paine tulopuolella 35 bar, säiliön alkupaine 1 bar ja lämpötila 300 K. Suurin pinta-ala vastaa suutinkertoimella 1,0 likimäärin mitattua vuotorakojen yhteistä pinta-alaa, kun läpän avautumiskulma on n. 9°. Lisäksi annettu suurin massavirta (alusta kriittisen virtauksen loppumiseen saakka), joka on suoraan, tasaantumisaika kääntäen verrannollinen teholliseen pinta-alaan.

Huomattakoon, että säiliön täyttymisaika on kääntäen verrannollinen ja massavirta suoraan verrannollinen aukon pinta-alaan, joten muille aukoille saa suuret helposti yo. taulukon pohjalta. Aukossa vallitsee kriittinen virtaus noin 40 % täyttymisajasta. Tämä voi ilmetä voimakkaamman, ulvovan tai viheltävän äänen loppumisena po. ajankohtana. Loppulämpötila suljetussa putkessa on 415 K eli 142 °C, edellyttäen, ettei lämpöä ehdi siirtyä seinämiin ja että sisältö sekoittuu riittävästi.

Taulukon perusteella voi arvioida myös paineen tasaantumisaika kun läppäventtiiliin ohittavan NS25-linjan palloventtiili avataan. Jos arvioidaan linjan ekvivalentiksi teholliseksi pinta-alaksi (voidaan laskea venttiilin aukon ja putken vastustietojen perusteella) n. 200 mm², saadaan taulukosta ajaksi n. 40 s.

5.2 Täyttymisaika ja venttiilin avautumishistoria

Jos pidetään totena, että venttiili on ollut onnettomuuden tapahtumahetkellä n. 9° avautuneena /1/, niin se olisi vaatinut noin yhden täyden kierroksen käsipyörältä sulkuasennosta laskettuna kun vaihteen välitys on n. 40. Jos edelleen vuotorako alkaa muodostua noin puolella tästä kulmasta, niin todelliseen avaamiseen vaadittaisiin puoli kierrosta käsipyörän akselilta. Irronneen käsipyörän akselia voidaan putkipihdeillä kiertää kertakiskaisuna kerrallaan enintään ehkä 90°, mikä vastaisi vain osaa suurimman raon todellisesta avautumista.

Mahdollista siten on, että akselia on avautumisalueella kiskaistu kahdesti (tai useammin), jolloin ensimmäisellä kerralla on saavutettu esim. 100 mm² tehollinen, suutinkertoimella kerrottu vuoto-ala. Tällä tasaantumiseen kuluu n. 80 s. Jos syttyminen on tapahtunut ensimmäisessä kiskaisussa, niin palon on täytynyt edetä putkiston sisällä huomaamatta sen ajan, kuin mitä on kulunut toisen kiskaisun aloittamiseen. Jos syttyminen vasta toisessa kiskaisussa, niin toisen kiskaisun on täytynyt seurata selvästi nopeammin kuin 80 s ensimmäisestä, mikäli syttymisen edellytyksenä pidetään nopeaa virtausta eli tasaantumaton paine-eroa.

Eräs vaihtoehto on, että venttiili on avautunut raolleen ja syttynyt jo käsipyörän väännöstä. Tällöin palon leviämisen huomaamattomasti on pitänyt olla niin hidasta, että sillä välillä on ehditty toimittamaan pihdit ja kiertämään akselia täyteen avautumiskulmaan saakka.

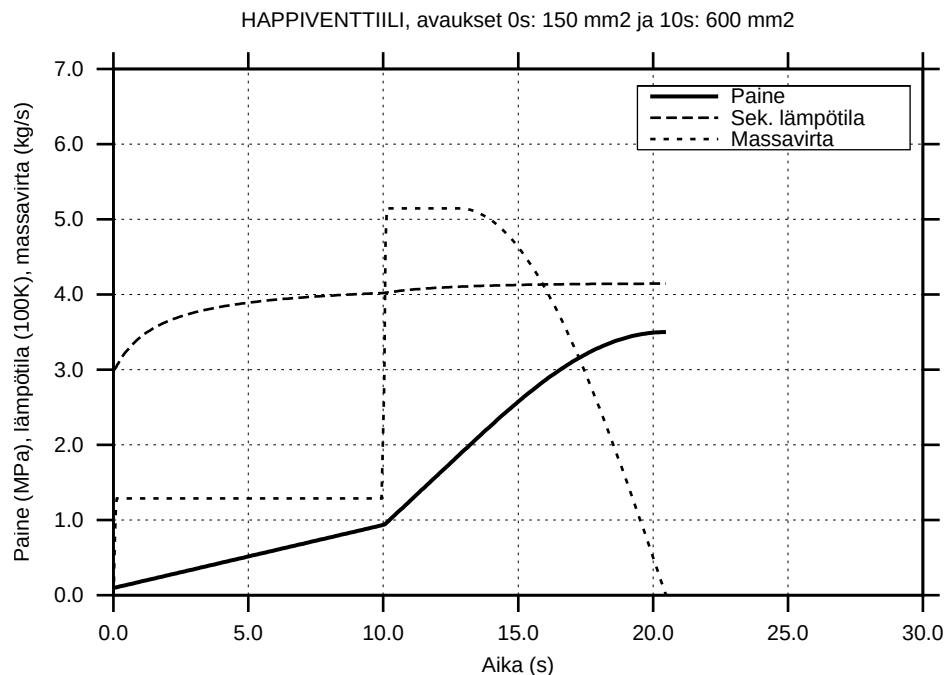
5.3 Täyttymisaika useampiportaisessa avauksessa

Seuraavassa esitetään edelleen pu204-ohjelmalla laskettuja tuloksia kun venttiilin varsinainen avautuminen eli virtausraon muodostuminen on tapahtunut kahden, kolmen tai neljän kiskaisun aikana. Viimeistä edellistä lukuunottamatta kaikissa tapauksissa on suurin eli viimeisessä kiskaisussa muodostunut tehollinen maksimivirtausrako (geometrinen aukko kerrottuna purkauskertoimella) suuruudeltaan 600 mm². Termodynaamiset arvot ovat kuten edellä. Avautuminen on porrastettu siten, että kunkin tapauksen jokaisella kiskaisulla aukko on avautunut saman verran raon leveyttä ja pituutta eli likimain saman kulmamäärän, jolloin pinta-ala on kasvanut portaittain neliöllisesti. Edellinen perustuu siihen, että mitat muuttuvat lineaarisesti kiertokulman funktiona, jos kulmat ovat pieniä.

Kaikissa tapauksessa, paitsi neljännessä, kuva 7, on oletettu, että aukko alkaa avautua juuri ensimmäisen kiskaisun alussa. Neljännessä vertailun vuoksi siten, että aukko alkaa muodostua ensimmäisen tehollisen kiskaisun puolivälissä. Kiskaisuväleiksi on valittu joko 5 tai 10 s sekä

kerran 30 s. Aukaisun kestoksi on valittu aina 0,1 s. Viimemainitun suuruusvaihtelu ei lyhyenä vaikuta tuloksiin.

Kuva 4 esittää kaksiportaista avausta, jossa toinen kiskaisu tulee 10 s ensimmäisestä. Säiliön eli suljetun putkenosan täyttymistä voi seurata ehkä parhaiten sen painekäyrästä, joka nousee siis tapahtuman aikana ylävirran arvoon eli laskelmissa käytettyyn 35 baariin. Ohjelmassa on käytetty optiota, joka lopettaa laskennan silloin, kun virtausaukossa havaitaan ensimmäinen todellinen tai numeerinen heilahdus toiseen virtaussuuntaan. Kuvaajat loppuvat siten piirroksessa tasaantumishetkeen, tässä n. 20,5 s kohdalla. Todellisuudessa paineen ja lämpötilan kuvaajat jatkuisivat sen jälkeen lämpöeristetyssä systeemissä vaakasuoraan tasaantumishetken arvoisina. Edelleen havaitaan, että aukosta virtaava massavirta pysyy aluksi kullakin aukolla (vakinaiset ylävirran arvot) vakiona niin kauan kun raossa vallitsee kriittinen virtaus. Kuvassa 4 siis n. 12,8 s saakka, minkä jälkeen virtaus pienenee nopeahkosti nolnaan. Virtauksen maksimiarvo on kriittisellä alueella n. 5,15 kg/s. Säiliön sekoituslämpötila on esitetty kuvassa yksiköissä 100 K, loppulämpötila on siis 415 K. Muistettakoon, että sekoittumisoletus vaikuttaa vain lämpötilan paikallisiin arvoihin, ei paineeseen tai täyttymisaikaan. Laskemalla muutoin sama tapaus, mutta käyttämällä kaksiportaiselle avaukselle porraskäyriä 5 s (ei esitetty) saatiin tasaantumisaikaksi 16,7 s.

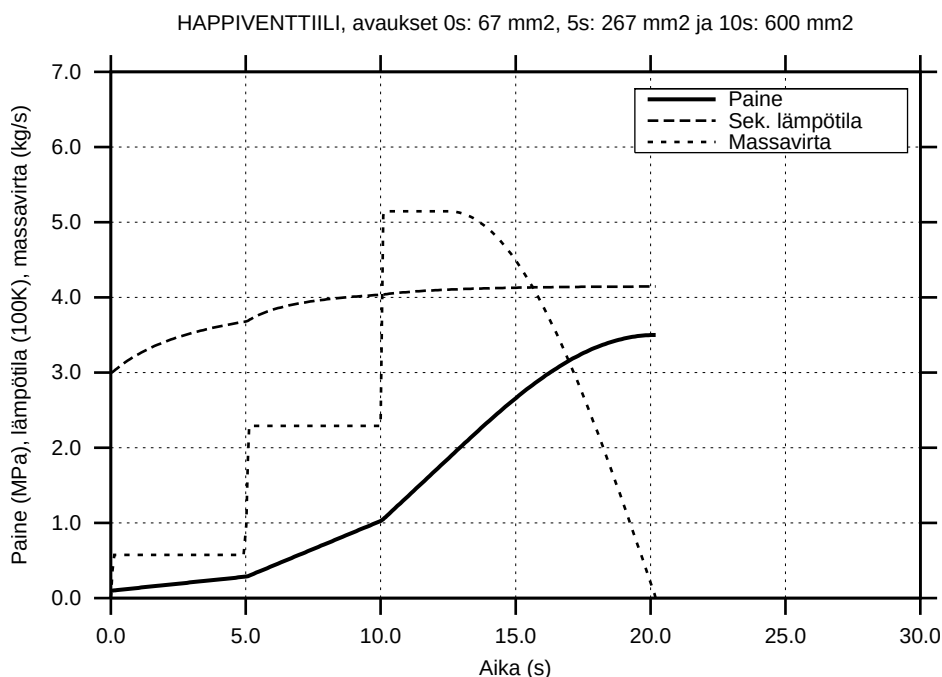


Kuva 4: Sulkuventtiilin kaksiportainen avaus. Molemmat avaukset yhtä suuret kiertymäkulmassa mitaten. Ensimmäisessä aukko avautunut teholliseen arvoon 150 mm², toisessa kiskaisussa 10 s ensimmäisestä täyteen arvoon 600 mm².

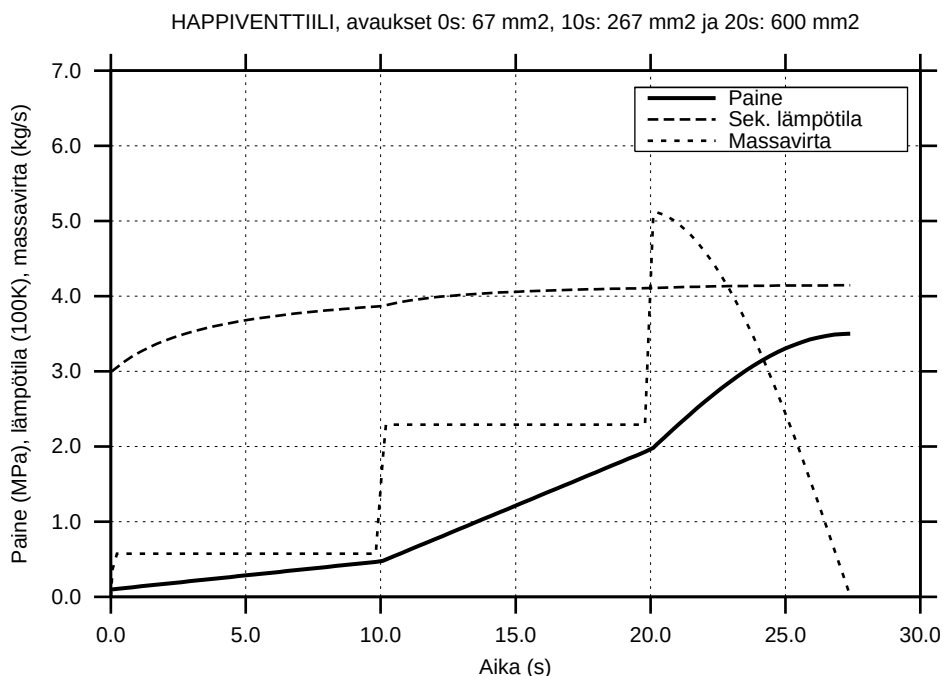
Kolmiportaisessa avauksessa, kun kiskaisuvälit ovat 5 s, kuva 5, on tasaantumisaika lähes sama kun edellä eli 20,2 s. Huomattakoon, että molemmissa pääavaus 600 mm²:iin sattuu samalle ajankohdalle.

Kuvassa 6 on edelleen kolmiportainen avaus tasavälein, mutta portaiden pituus on nyt 10 s. Koko tapahtumaketju venyy siten, että kriittinen virtaus loppuu jo toisen portaen lopussa n. 19,2 s kohdalla, jolloin myös maksimimassavirta ehtii vain käväistä lähellä edellisten tapaus-ten arvoja. Tasaantumisaikanhetki on 27,4 s. Muistettakoon, että vaikka pienemmällä aukolla

massavirta on pienempi, niin maksimivirtausnopeus aukossa (reitin ahtaimmassa kohtaa) on kriittisen virtauksen aikana sama kaikissa tapauksissa.



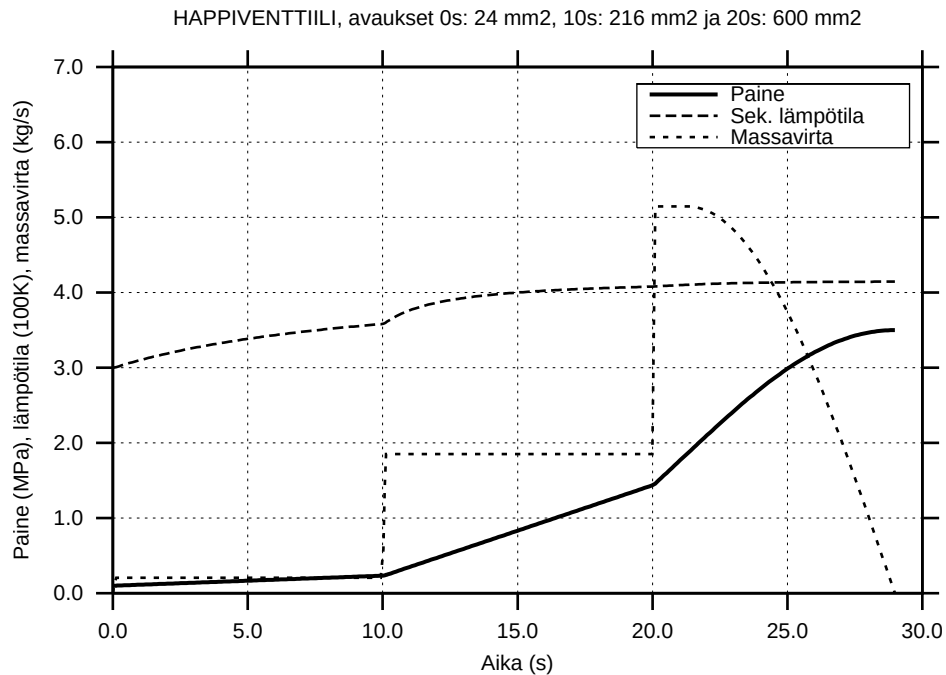
Kuva 5: Kolmiportainen avaus 5 s välein. Portaat 67 mm², 267 mm² ja 600 mm². Kriittisen virtauksen loppuminen, jolloin paine säiliössä on n. 18,5 bar, sijoittuu n.12,5 s kohdalle.



Kuva 6: Kolmiportainen avaus 10 s välein. Muutoin sama tapaus kuin edellä. Tässä viimeinen avaus sijoittuu jo alikriittisen virtauksen alueelle.

Edellä olevissa tapauksissa oletettiin, että aukko alkaa avautua juuri ensimmäisen tehollisen kiskaisun alussa eli venttiilin lautanen on jäänyt edellisessä kierrossa äärimmäiseen kohtaan, jossa se vielä pystyy pitämään venttiilin tiiviinä. Kuvassa 7 esitetään edellisen variaatio siten, että aukko alkaa muodostua ensimmäisen tehollisen kierron puolivälissä. Aukkoporrastus

muuttuu hieman toisenlaiseksi: 24 mm^2 , 216 mm^2 sekä 600 mm^2 . Kriittinen virtausvaihe loppuu $21,3 \text{ s}$ kohdalla. Tasoittumisaika on nyt $29,0 \text{ s}$.



Kuva 7: Kolmiportainen avaus, jossa kierrot edelleen yhtä pitkiä, mutta virtausaukko alkaa muodostua vasta ensimmäisen kierron puolivälissä. Kriittinen virtaus loppuu juuri ennen kolmatta avausta

Tasoittumisaikaan vaikuttaa erityisesti ensimmäisessä tehollisessa kierrossa muodostuvan aukon suuruus. Asian havainnollistamiseksi laskettiin vielä kolmiportainen tapaus, jossa aukot olivat samat kuin perustapauksissa (67 , 267 ja 600 mm^2), mutta toinen kiskaisu seuraa vasta 30 s kuluttua ensimmäisestä, kuva 8. Kriittinen virtaus loppuu toisen kiskaisun jälkeen $34,2 \text{ s}$ kohdalla. Pidennyksestä huolimatta kolmas kiskaisu hetkellä 40 s ehtii sijoittua vielä ennen virtauksen loppumista, joka on nyt kohdalla $45,2 \text{ s}$, ilman kolmatta kiskaisua n. 50 s .

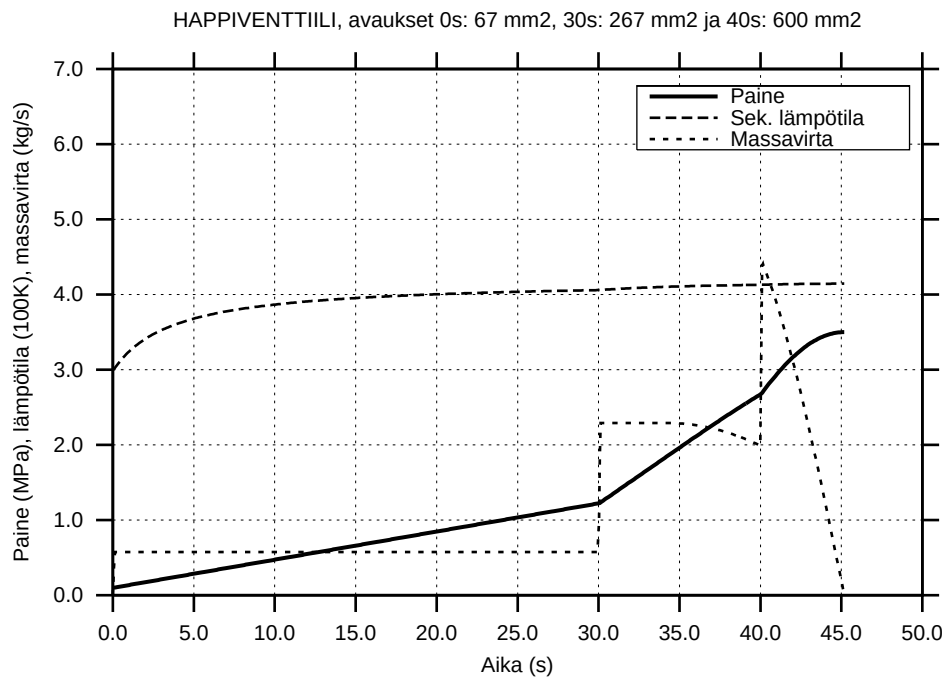
Edellä oli aukon tehollinen maksimiarvo aina 600 mm^2 eli alustavien tietojen mukaisen, 9° kulmaa vastaavan raon geometrinen vapaa pinta-ala kerrottuna suutinkertoimella $1,0$ olettaen raon leveyden noudattavan parabelisegmentin kaltaista riippuvuutta sen pituuden (jänteen) suhteen. Arvo saattaa olla varsin sopiva todellista tilannetta arvioitaessa, sillä tarkemmat mitaukset /1/ vaikeasti jälkikäteen määriteltävän ahtaimman virtausraon suhteen viittaavat siihen, että geometrinen ala olisi tätä luokkaa tai hieman suurempi.

Virtausaukon suuruusluokan vaikutuksen hahmottamiseksi laskettiin vertailuksi kolmiportainen perustapaus 10 s välein siten, että kaikki pinta-alat oli kerrottu teräväreunaisen aukon kertoimella $0,60$. Portaiksi muodostui tällöin 40 , 160 ja 360 mm^2 . Tasoittumisajaksi saatiin $36,0 \text{ s}$, kuva 9.

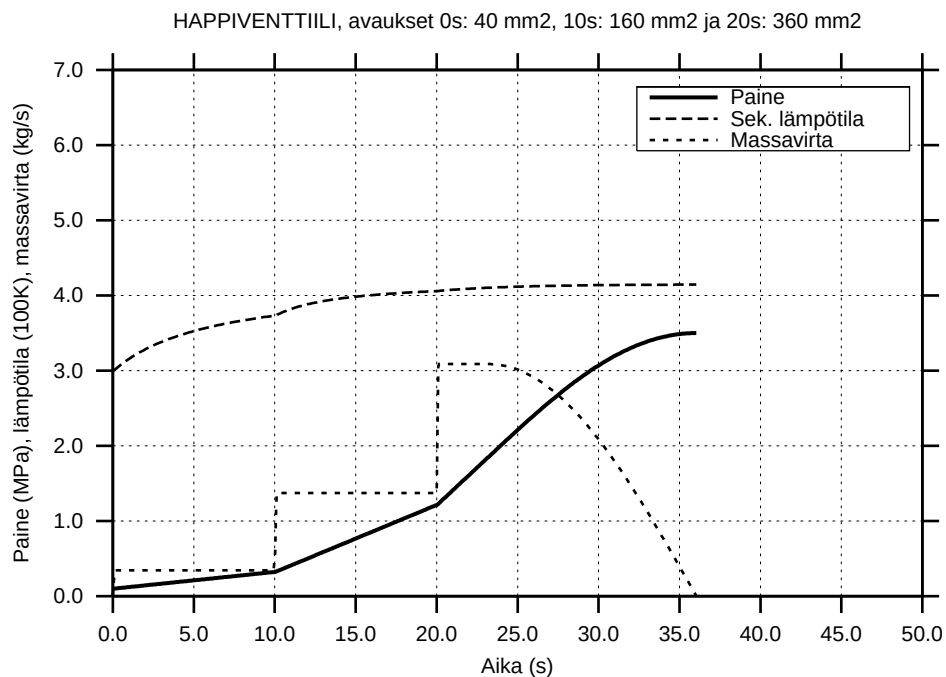
Edellä käytettiin lyhyimpänä avausvälinä 5 s . Vieläkin lyhyempi avausväli saattaa olla mahdollinen, jos pihtien asettelu on helppoa ja työskentelyasento hyvä.

Kovin pitkät avausvälit eivät ole mahdollisia ainakaan ensimmäisen kunnon vuotorakon syntymisen jälkeen, jos syttymisen edellytyksenä pidetään voimakasta virtausta. Jos syttyminen

liittyy kiskaisuun, niin muita vaihtoehtoja todennäköisempää on, myös portaitaisen analyysin perusteella, että lopullisen avauskulmaan johtava kiskaisu olisi tapahtunut jo sisäisen palon alkamisen jälkeen.

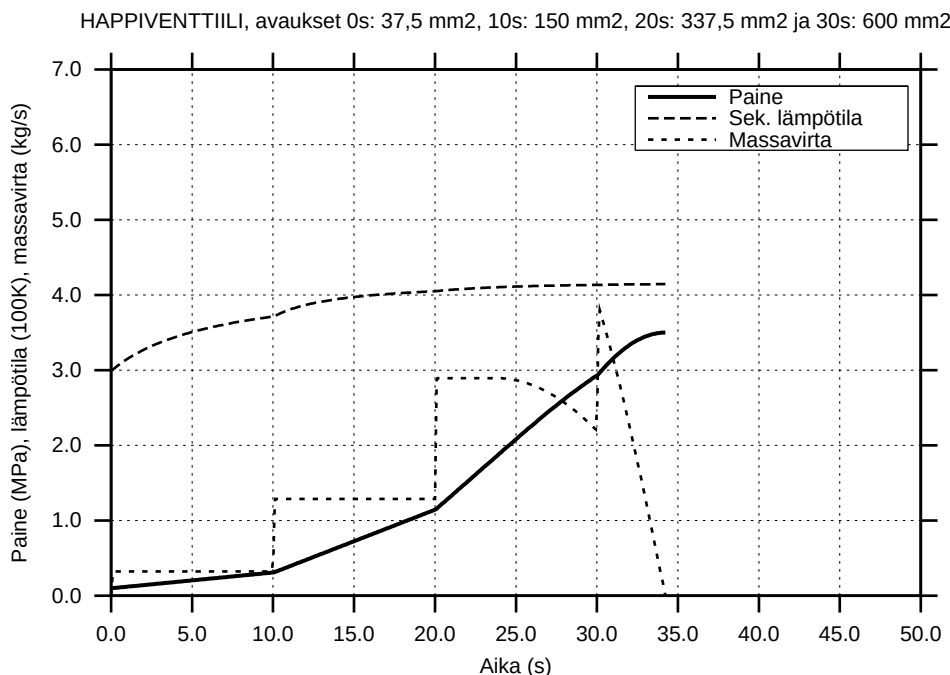


Kuva 8: Kolmiportainen avaus siten, että toinen kierto seuraa ensimmäistä vasta 30 s kuluttua, muutoin arvot ovat kuten kuvassa 6. Kriittinen virtaus loppuu ajanhetkellä 34,2 s. Huomaa, että vaaka-akseli ulottuu nyt 50 sekuntiin.



Kuva 9: Kolmiportainen tasa-avaus, mutta kaikki virtauspinta-alat kerrottu suutin-kertoimella 0,60. Vaaka-akseli 50 s.

Siltä varalta, että varsinaisella avautumisalueella olisi tehty neljä samansuuruista kiskaisua 10 s välein, laskettiin lopuksi tapaus portain 37,5; 150; 337,5 ja 600 mm², kuva 10. Kriittinen virtaus loppuu nyt kolmannen portaan aikana kohdalla 23,8 s. Tasaantumisajaksi saatiin 34,2 s.



Kuva 10 Neliportainen avaus. Avaukset 10 s välein. Tasaantumisaika on vain hieman pidempi kuin vastaavassa kolmiportaisessa avauksessa, kuva 6.

Kokonaisuudessaan moniportaisten avautumisien laskelmista todetaan, että tasaantumisaika 22 m pitkän putkenosan muodostamalle säiliölle vaihtelee tehdyin oletuksin n. 20 ja 45 s välillä. Kokonaisaikaan vaikuttavat merkittävästi ne vaiheet avautumisessa, joissa vuotorako on vielä pieni. Uusia vaihtoehtoja voi hahmotella karkeasti edellä esitetyistä tuloksien perusteella sekä taulukon 3 avulla. Portaittaisten laskelmien tuloksia voi muuntaa toiselle tilavuudelle kertomalla aika tilavuuksien suhteella tai toiselle teholliselle aukoilta kertomalla kaikki aukot ja jakamalla aika samalla suhteella. Näissä muunnoksissa on kuitenkin huomattava, että portaiden pituudet muuttuvat samassa suhteessa kuin kokonaisaika eli kuvan aika-akseli muuntuu.

6 KAASUN MUKANA KULKEUTUVAN HIUKKASEN TÖRMÄYKSESTÄ

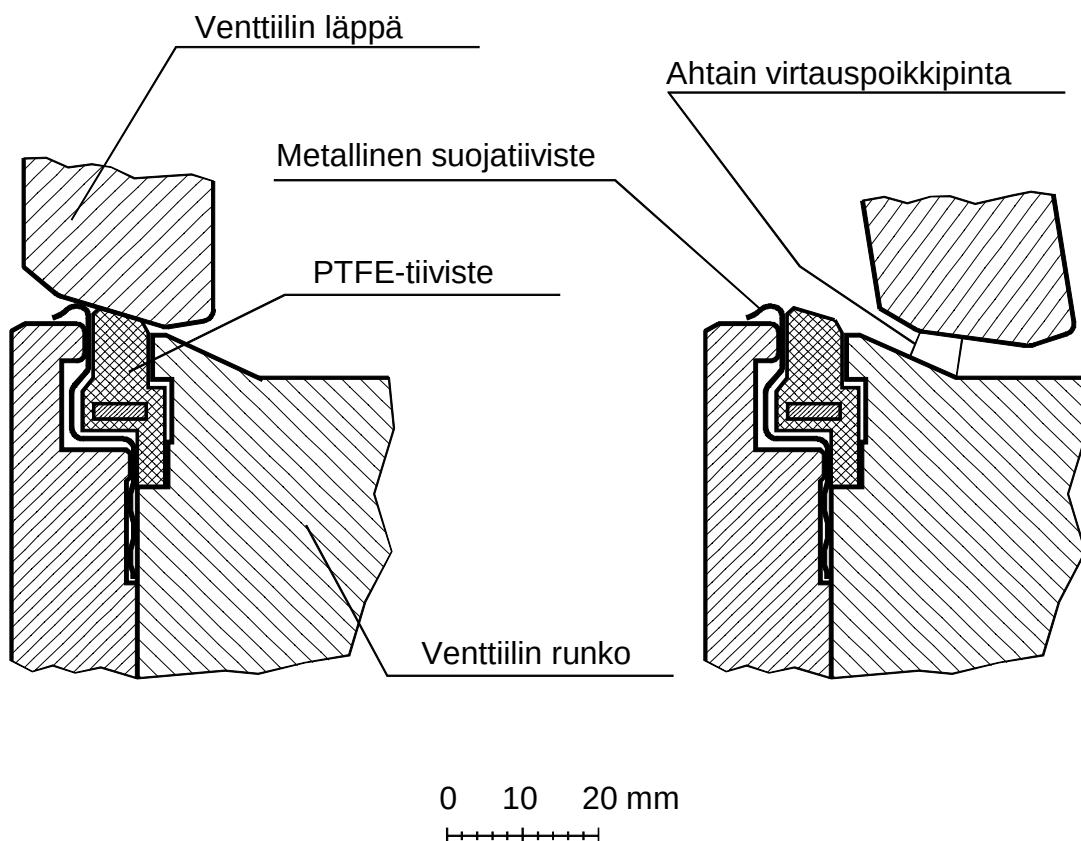
Kokeellisesti on havaittu, että eräät puhtaan hapen virtauksen mukana kulkeutuvat hiukkaset syttyvät itse tai sytyttävät muita kohteita törmätessään niihin. Eräänä raja-arvona tarvittavalle virtausnopeudelle on mainittu n. 50 m/s.

Jos oletetaan, että hiukkasen liike-energia muuttuisi törmäyksessä sen tasan jakautuneeksi sisäenergiaksi eli 'lämmöksi', niin lämpötilan nousuksi saadaan (molemmat verrannollisia hiukkasen massa, joka siis supistuu pois) $\Delta T = w_H^2 / 2c_H$, jossa c_H on hiukkasen ominaislämpökapasiteetti po. prosessissa. Jo oletetaan c_H :lle metalleille tavanomainen lämpökapasiteetin arvo, n. 500 J/kgK, niin nopeudella 50 m/s lämpötilan nousuksi saadaan vain n. 2,5 K. On siis selvää, ettei prosessi ole oletetun kaltainen, vaan monimutkaisempi esim. siten, että vain pieni osa hiukkasesta kokee plastisen muodonmuutoksen ja saavuttaa mm. riittävän lämpötilan syttymiselle. Jos hiukkanen liikkuu samalla kohteen pinnan tasossa, voidaan puhua

myös kitkalämmön kehityksestä. Tämän merkittävä osuus edellyttää kuitenkin suurta pintapainetta tai muuta tartuntaa eli senkin edellytyksenä on paikallinen plastisoituminen.

Ehtoihin sille, että vain riittävän pieni osa hiukkasesta plastisoituu sekä kuumenee riittävästi, saattaa liittyä perussyyn eli geometrian lisäksi mm. lämpötilan johtumisnopeus (terminen diffusiviteetti) sekä plastisoitumisrintaman etenemisnopeus hiukkasen materiaalissa.

Ilmeisestikin yksittäisen hiukkasen syttyminen riippuu vain heikosti muista läheisistä törmäyksistä. Sen sijaan kohteen syttymiseen vaikuttaa lisäksi sen materiaali sekä hiukkasten törmäystiheys. Myös törmäävien hiukkasten oksidikalvoa poistavalla vaikutuksella saattaa olla tärkeä merkitys tapahtumassa.



Kuva 11 Kaaviollinen esitys venttiilin hieman avautuneen läpän ja rungon välisestä virtausraosta. Virtaus vasemmalta oikealle. Oikealla läpän leikkaus piirretty asentoon, jossa se kiertynyt kara-akselin ympäri 9° alavirtaan päin. Jos asetelma on todellisuudessa kuvan mukainen, niin leikkaukseen syntyy jopa 25 mm pitkä suutin, jossa virtaus saattaa laajenevan osan matkalta nousta jopa ylikriittiseksi ja nopeus siten varsin suureksi. Huomattakoon, että koko rakokehän alueella on useita erilaisia virtausmahdollisuuksia. Ylävirtaan kääntyneellä puolella jopa sellainen, että hiukkaset voisivat mahdollisesti törmätä kohtuullisella nopeudella myös suoja tiivisteeseen. Hiukkastörmäysten suhteen on mm. rungon muodolla ja sen liitoskohdalla putkilaippaan suuri merkitys.

Karkea numeerinen laskenta paleus21-ohjelmalla /3/ osoitti, että ekvivalentilta halkaisijaltaan 0,1 mm oleva teräshiukkanen ehtii kiihtyä venttiilin läpän ja rungon välisessä raossa jo alle 5 mm:n matkalla nopeuteen 55 m/s, kun virtauksen keskinopeutena käytetään 200 m/s (kriitti-

nen nopeus eli todennäköinen maksimiarvo raossa oli siis 300 m/s) ja tiheytenä 28,5 kg/m³. Nopeus 11 mm jälkeen oli 75 m/s ja 100 m/s ylitettiin n. 28 mm kohdalla. Suuremmalle 0,2 mm:n hiukkaselle 50 m/s ylittyi n. 8,2 mm:n kiihtymisen jälkeen. Näyttäisi siis siltä, että nopeusedellytykset raja-arvot tarpeeksi ylittävälle hiukkasille ovat olemassa.

Edelleen on huomattava, että vain hieman raollaan olevan venttiililautasen ja tiivisteiden välistä purkautuva suihku ja sen myötä myös mahdolliset hiukkaset voivat suuntautua ainakin osassa rakoa kohtuullisen jyrkässä kulmassa tiivisteosan jälkeisiin pintoihin. Osittain venttiilin valmistajan esitteen, osittain mittausten perusteella piirretty kuva 11 esittää suuntaa antavasti virtaussuihkun suuntautumista. Oikean puoleisessa kuvassa lautasen leikkaus on piirretty asentoon, jossa lautanen on kiertynyt 9° eli oletetun maksimiavauksen verran. Varmaa kuvaa suihkuasetelmasta eri kohdissa rakoa on hankalahkoa saada ilman vaativaa geometrista tarkastelua tai virtauskoetta itse venttiilillä.

Eri kohdissa rakoa voi syntyä hyvinkin erilaisia virtausreittejä. Jos kuvan asetelma on tosi, niin lautasen ja venttiilirungon väliin voi muodostua jopa Laval-suutin, jonka lopussa nopeus voi saavuttaa arvon n. 450 m/s. Vaikka suihkun törmäyskulma po. asetelmassa onkin vain n. 20°, niin hiukkasten nopeus on vastaavasti suuri. Tämänkaltaiselle raon muodolle olisi hiukkasten kiihtyvyysskalkelmassa käytettävä selvästi suurempaa keskinopeutta kuin mitä edellä oletettiin.

Kuvassa 11 on esitetty lautasen leikkaus alavirtaan siirtyneellä puolella. Ylävirtaan siirtynyt puoli ei muodosta yhtä selvää suutinta, mutta sielläkin voi syntyä kohtuullisia nopeuksia ennen metallitiivisteasetelmaa.

7 METALLIN PALAMINEN SEKÄ OSIEN HANKAUS, MUODONMUUTOS TAI MURTUMINEN SYTTYMISLÄHTEENÄ

7.1 Yleistä metallin palamisesta ja syttymisestä kitkakuumennuksessa

Useimmat metallit yhtyvät sinänsä varsin kerkeästi happeen. Käytännössä niitä kuitenkin suojaa jatkuvalta palamiselta pintaan muodostuva oksidikerros (ainakin sanan laajemmassa mielessä). Matalammissa lämpötiloissa on puhtaan metallisen pinnan hapettuminen siksi hidasta, että vähänkin suuremman hiukkasen pintalämpötila ei hapettumisreaktiossa juuri nouse eikä jatkuvaa palamista pääse kehittymään. Sensijaan on raportoitu, että hyvin hienojakoinen (tyhjässä tai suojakaasussa) valmistettu metallipöly syttyy jopa räjähdysmäisesti, kun se sekoitetaan äkisti ilmaan.

Metallin voimakkaan, jatkuvan palamisen ehtona ilmeisestikin on, että sen lämpötila ylittää tietyn rajan ja että happi pääsee kosketuksiin puhtaan metallin kanssa. Lisäksi lämpötaseesta seuraa, että syntyvän reaktiolämmön (palamistehon) on katettava reaktioerroksesta metalliin johtuva sekä pinnasta konvektion, kulkeutumisen ja säteilyn kautta poistuva lämpö.

Pintatehoa suurettavat: pinnan puhtaus, korkeat metallin ja kaasun lämpötilat (molekyylien lämpöliike), suuri reaktioenergia (palamislämpö), pieni palamisreaktion aktivointienergia, kaasun tiheys (suurempi pommitustiheys suhteessa metallipinnan molekyyliitiheyteen; tässä siis paineen merkitys tulee esiin), kaasun suuri happipitoisuus (jos passiivista kaasua, se keraantyy rajakerrokseen) ja reaktiotuotteiden helppo kulkeutuminen pois rajakerroksesta tai sulana pinnalta. Kaasun virtausnopeudella on merkitystä erityisesti, jos happi ei ole puhdasta, sillä massansiirtokerroin (hopen siirtyminen muiden kaasujen läpi) suurenee nopeuden myötä,

yleensä verrannollisena nopeuden potenssiin n. 0,80. Jos happi on puhdasta eikä kaasumaisia reaktiotuotteita synny, niin nopeudella ei ole enää samassa määrin merkitystä massansiirtokertoimen kautta, mutta kummassakin tapauksessa siten, että suuri virtausnopeus kuljettaa sulan oksidin tai kiinteänkin oksidin sulan pinnalta pois paljastaen tuoreen metallipinnan. Juuri viimeiseksi mainitut seikat tekevät kiinteän aineen tehokkaan palamisen mahdolliseksi.

Edellä mainitut ilmiöt tulevat esiin mm. teräksen polttoleikkauksessa, jossa aloituskohdastaan kohtalaiseen punahehkuun (n. 700 °C) kuumennettuun teräkseen kohdistetaan ohut, mutta voimakas happisuihku. Tällöin rauta palaa suihkun vaikutuskohdasta rautaoksidiksi ja suihkun liikemäärä puhalttaa kuonan pois. Yleisiä vaatimuksia hyvälle leikattavuudelle ovat mm.: kuonan oltava herkkäliikkeistä, metallin syttymislämpötilan sulamislämpötilan alapuolella sekä kuonan sulamispisteen metallin sulamispisteen alapuolella tai ainakin lähes samalla tasolla. Lisäksi metallin palamislämmön oltava suuri ja lämmönjohtavuuden tarpeeksi pieni, jotta lämpötila pysyisi tarpeeksi korkeana myös syvemmillä railossa. Kaasun happipitoisuuden tulee olla vähintään 98...99 %. Hieman pienemmilläkin pitoisuuksilla poltto onnistuu, mutta se vaatii suuremman ja nopeamman happivirtauksen. Hiiliteräksillä korkea hiilipitoisuus hidastaa leikkausta ilmeisestikin muodostuvan kaasumaisen hiilidioksidin hapen massansiirtoa hidastavan vaikutuksen takia.

Huomattakoon, että metallien yleistä palamista arvosteltaessa ei leikattavuus hapella kuitenkaan anna palavuudesta oikeaa kuvaa, sillä polttoleikkauksessa vaaditaan nimenomaan selvästi rajattua ja hyvin hallittavissa olevaa palamisaluetta, leikkausrailoa. Esimerkiksi alumiinia ei voi polttoleikata: metallin sulamispiste n. 660 °C, alumiinioksidin n. 2000 °C, mutta silti alumiini palaa varsin helposti sopivissa olosuhteissa. Ilmeisestikin alhaisen sulamispisteen takia oksidi pyyhkiytyy sulaa pitkin pois palamiskohdasta. Palamista edistävää tässä alhaisen sulamispisteen lisäksi alumiinin korkea palamislämpö ($\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$), joka on 6...7-kertainen teräksen massa- ja noin kaksinkertainen tilavuuteen verrattuna.

Ruostumattomalla teräksellä ovat metallin ja oksidien sulamislämpötilat ilmeisesti jokseenkin samalla tasalla (metalliseoksella n. 1420 °C), mutta jos puhtaanpuoleisia kromioksiedeja pääse muodostumaan, niin niiden sulamispisteet voivat olla 2300 °C tai enemmänkin. Happileikkaus ei onnistu sellaisenaan, mutta kylläkin erikoismenettelyin.

Metallin syttymisessä hapessa kitkan vaikutuksesta on raportoitu sekä onnettomuustapauksissa sekä laboratoriokokeissa. Kokeissa on painettu esimerkiksi pyörivää putkimaista kappaletta aksiaalisesti toista vasten. Tilanne muistuttaa kitkahitsausta ja johtaa melko pian koko seinämän kuumenemiseen sulamislämpötilaan tai sen lähelle ilman, että happi juuri avustaisi lämpenemisprosessissa. Hankaavat otsapinnat puhdistunevat metallisiksi, mutta happi ei pääse niihin suoraan vaikuttamaan, vaan pikemminkin saumasta pursuavaan sulaan tai kuumentuneeseen putkenseinämään. Kokeen demonstraatioarvo suhteessa po. tehtävään jää täten melko vähäiseksi.

Raportoidussa kantoraketin laukaisualustan happijärjestelmän palossa syttymisen uskotaan lähteneen edestakaiseen auki-kiinni-värähtelyyn joutuneen varoventtiilin sulkuelimen ja muun rakenteen välisestä kitkakuumnuksesta. Tässäkin tapauksessa kuumennus on pitempiaikaista, mutta ilmeisestikin hankauspinta, josta siis oksidikerros hankautuu pois, altistuu myös suoraan hapelle. Ilman erillisiä kokeita ei kuitenkaan voida sanoa, onko metalli syttynyt jo selvästi sulamislämpötilaa alhaisemmassa pinnan lämpötilassa hapen vaikutuksesta vai vasta sitten, kun kuumentuminen ollut totaalisempaa.

Läppäventtiin lautasen joutumista virtauksessa värähtelytilanteeseen on saatu suullista tietoa. Edellytyksenä sille, että samalla voisi syntyä syttymiseen riittävä suuri paikallinen kuumennus

on, että hankaus on tarpeeksi voimakas, muttei kuitenkaan sellainen, että se vaimentaa värähtelyn. Tällaisen ehdon voisi täyttää lähellä kiertymäakselia oleva hankauskohta. Lisäksi värähtelyn täytyy olla taajaa riittävän tehon aikaansaamiseksi. Asian tutkimiseksi analyttisesti tarvittaisiin yksityiskohtaisempaa tietoa asetelmaan liittyvistä aerodynaamisten voimien ker-toimista.

Oleellista metallin syttymiselle on aina suojaavan oksidikerroksen pettäminen tavalla tai toi-sella, esim. murtumalla tai hankautumalla. Jos pinta kuunnennetaan muulla tavoin tarpeeksi korkeaan lämpötilaan, niin mekaanista poistoa ei tarvita. Tällöin nimittäin oksidikerros sulaa, murtuu, liukuu pois sulavan metallin pinnalta tai liukenee johonkin kolmanteen aineeseen.

7.2 Kitkakuunnennusilmiö ja pintalämpötilan nousu läppäventtiilissä

Jos esitetään oletus, että po. venttiili on syttynyt jumittuneen läpän avausriuhaissa kerralla, niin joudutaan tilanteeseen, joka on erilainen kuin kummassakin edellä kuvatussa tapauksessa. Nyt siis syttyminen edellyttää, että jossain kohtaa läpän rakenteen ja muun metallisen osan välillä on takertuva kohta, jonka rajapinnassa on suuri pintapaine tai siihen on muuten synty-nyt tartunta. Kun pinnat äkisti liikkuvat toistensa suhteen, niiden välissä kehittyy tehoa joka kuumentaa ne korkeaan lämpötilaan, paikoitellen jopa sulamislämpötilaan. Niiden edelleen liukuessa paljastuu puhdasta, kuumentunutta metallista pintaa hapen vaikutukselle ja pinta al-kaa palaa. Edellytyksenä palon jatkumiselle on, että palamisesta syntyvä pintateho ylittää johtumisen, konvektion ja säteilyn jäähdystystehon. Erityisesti johtuminen on tässä tapaukses-sa oleellinen jäädyttävä tekijä, koska nopean lämmityksen takia kuumentunut kerros on hy-vin ohut ja lämpötilagradientti metallissa jyrkkä; tässä on siis tapauksen oleellinen ero pitem-pään jatkuneeseen hankaukseen. Jos pintalämpötila on alle oksidien sulamislämpötilan, niin sen pitää vielä pystyä nousemaan sulamislämpötiloihin saakka ennen kuin kiinteät oksidit eh-tivät peittämään metallista pintaa liiaksi.

Avausyrityksessä syntyvä työ voidaan arvioida esim. siten, että oletetaan 500 N:n nettovoim-an (todellinen voima välitysten kitkat (hyötysuhde) huomioon ottaen suurempi, jopa n. kak-sinkertainen) vaikuttavan pihlien päässä kohdassa, joka liikkuu riuhtaisussa 0,5 m. Työksi muodostuu tällöin 250 J. Vastaava keskimääräinen teho saadaan jakamalla edellinen liikkee-seen kuluneella ajalla: esim. 0,10 s tuottaa tehon 2500 W. Jos toisiaan koskettavat pinnat ovat samaa ainetta, niin teho jakaantuu puoliksi niiden kesken. Siten em. kokonaistehon jakautues-sa tasan, tämän tapauksen mittojen suhteen kohtuulliselle, 1 cm²:n alalle kokonaistehotihey-deksi eli kokonaistasolähteeksi muodostuu $q_{\text{tot}} = 2500 \text{ W/m}^2$ ja vastaavasti kumpaankin pin-taan johtuu $q_p = 1250 \text{ W/cm}^2$. Pintalämpötilan suuruuteen vaikuttavat suoraan verrannolli-sesti vaikuttavan pintatehon lisäksi materiaalin lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti sekä vai-ikutusaika. Jos pintateho on vakio, niin pintalämpötila on verrannollinen ajan neliöjuureen. Jos sensijaan kokonaistyö pidetään vakiona, niin teho on kääntäen verrannollinen aikaan ja siten loppulämpötila kääntäen verrannollinen ajan neliöjuureen, siis esim. ajan lyhentäminen puo-leen nostaa pintalämpötilan n.1,4 -kertaiseksi.

Seuraavassa taulukossa 4 on muutamia numeerisesti laskettuja (/4/, /5/) pintalämpötilan nou-suja ruostumattomalle teräkselle (lämmönjohtavuus 15 W/Km, lämpökapasiteetti 500 J/kgK) eri pintatehoilla kun vaikutusaika on 0,10 tai 0,15 s.

Taulukosta havaitaan, että asetelmassa liikutaan alueella, jossa suurehkot lämpötilannousut ovat periaatteessa mahdollisia, jos jumittuminen on keskittynyt tarpeeksi yhteen kohtaan. Suuremmat pintatehot edellyttävät kylläkin 1 cm² pienempää kosketuspinta-alaa ja samalla

melko suurta kitka- tai kohtuullista leikkausvoimaa pintojen välissä. Edellä esitetyn mukaan laskien kokonaistehotiheys 5000 W/cm^2 edellyttäisi siten vain $0,50 \text{ cm}^2$ alaa.

Ruostumaton teräs		
Vaikutusaika (s)	Kok. pintateho (W/cm^2)	Lämpötilan nousu (K)
0,10	5000	1163
0,10	2500	581
0,10	1250	291
0,15	5000	1424
0,15	2500	712
0,15	1250	356

Taulukko 4

Lämpötilan nousu kahden hankaavan kappaleen pinnoilla, kun hankausvälissä kehittyy erilaisia kokonaispintatehoja 0,10 tai 0,15 s ajan. Aine ruostumaton teräs. Oletettu puoliäärettömät kappaleet yksidimensioiden johtuminen, mikä toteutuu, jos lämpötilan tunkeuma on pieni verrattuna alueen halkaisijaan. Kumpaankin puoliskoon johtuu erikseen puolet taulukossa mainitusta tehosta. Ks. myös taulukoita kohdassa 7.3

Yllämainittuja tasan jakautuneita pintatehoja on kuitenkin melko vaikea saavuttaa po. geometria-, työ- ja materiaaliarvojen puitteissa ellei arvioitu työmäärä purkautu vielä lyhyemmässä ajassa kuin taulukossa oletettu. Tällainen tapahtuma voi olla mahdollinen esim. siten, että työ varastoituu ensin kimmoisesti rakenteeseen (käsipyörän kara kiertyy ilman, että laukeamista tapahtuu) ja sitten purkautuu äkillisesti jumittumisen laukaisurajalle saavuttaessa. Toisaalta tämä merkitsee myös kuumen pinnan nopeampaa jäähtymistä. Kokemusperäisesti tiedetään, että käytännössä korkeita lämpötiloja aina sulamispisteeseen saakka saavutetaan melko herkästi kosketuspintojen epätasaisuuksien ja aiemmin muodostuneiden 'siltojen' kohdalla. Näihin pätee toisaalta vieläkin nopeampi jäähtyminen.

Ruostumattomalla teräksellä lämpötilan nousu ehtii tunkeutua 0,15 s:ssa n. 2 mm syvälle. Jos kappale on tätä ohuempi, niin pintalämpötila nousee edellä esitettyä nopeammin.

Hiiliteräkselle tehtynä vastaava tarkastelu antaa pienempiä arvoja: esim. 0,15 s:n kestoisena kokonaispintateho 2500 W/cm^2 nostaa lämpötilaa vain 410 K. Alumiiniseoksilla nousu on vielä pienempi, mutta sensijaan esim. tinapronsseilla samaa luokkaa kuin hiiliteräksellä tai jopa enemmän. Huomataan, etteivät eri metallit asetu vielä tällä perusteella kokemusperäisesti tunnettuun järjestykseen syttymisherkkyiden suhteen.

Ilmeisesti onkin niin, etteivät pelkät keskimääräiset pintatehot riitä selittämään pintojen lämpötilakäyttäytymistä vaan materiaalien ominaisuusyhdistelmät ovat tärkeässä asemassa lämpötilahuippujen muodostumiseen. Erityisesti materiaalien välinen kitka ja tarttumisominaisuudet, joita tribologiassa käsitellään pääasiassa kulumisen kannalta, ovat tärkeitä. Ilmiönä tribologiassa erotetaan mm. adhesiivinen kuluminen, jossa mikrokontaktit johtavat adhesiivisiin metallisiin liitoksiin ('kylmähitsautumisiin'), jotka sitten leikkautuvat irti synnyttäen kulumishiukkasia. Tässä materiaalien erilaiset ominaisuudet tulevat selvästi esiin mm. kitkakertoimien kautta: kahden rautametallin välille ilmoitetaan kitkakertoimiksi esim. 0,7 ... 1,2, mutta pronssille tai messingille itseään vasten vain 0,3 ... 0,5. Valitsemalla sopivasti kaksi erilaista metallia päästään vielä suotuisampiin arvoihin. Perinteisesti pidetään kovan teräksen ja pronssin yhdistelmää tässä suhteessa edullisena (huom! myös kipinäinnin esto syttymisaroissa paikoissa).

Jos pintapainetta vielä edellisestä lisätään, mikrokontaktien tiheys kasvaa ja adhesiivinen kuluminen muuttuu tahmautumiseksi, jolloin pinta rikkoutuu suurehkoilta alueilta (jos liike lisäksi tästä syystä lakkaa, puhutaan kiinnileikkaantumisesta) ja näinollen puhdasta metallista pintaa voi paljastua erityisen herkästi hapen vaikutukselle. Lisäksi näissä tapauksissa irtoavat hiukkaset saattavat olla varsin suuria johtaen abrasiiviseen kulumiseen. Varsinkin metalleilla voi hiukkanen kovettua muokkauslujittumisen kautta (austeniittiset ruostumattomat teräkset) ja kyntää sitten toista tai molempia lähtöaineita siten, että kitkateho keskittyy varsin pieneen tilavuuteen kerrallaan ja saattaa siten synnyttää mahdollisesti hyvinkin korkealämpötilaisen hiukkasen. Joko kiinnipysyvä tai irtoava kuuma hiukkanen voinee hyvinkin toimia syttymislähteenä, myös metalleille puhtaassa hapessa. Perusteluna viimeksimainitulle voidaan pitää mm. vertailua virtauksen mukana kulkeutuvien nopeiden hiukkasten kykyyn syttyä törmäyksessä itse ja sytyttää myös kohtionsa. Yksittäisen kuumen hiukkasen, joko takertuneen tai lentävän, kyky sytyttää metalli hapessa on muutoin huonosti tunnettu.

7.3 Venttiilin karan kimmoisen kiertymä ja jumittumisen laukeaminen

Edellä viitattiin mahdollisuuteen, että venttiilin kara-akseli kiertyisi ensin avausyrityksessä kimmoisesti ja jumittumiskynnyksen ylittyessä akseli liikahtaisi selvästi edellä esitettyä nopeammin synnyttäen hankauskohtaan hetkellisen, hyvinkin suuren tehotiheyden. Tämän vaihtoehdon tarkistamiseksi arvioitiin liikejärjestelmän jousto laskennallisesti seuraavin oletuksin ja tuloksin.

Oletettiin halkaisijaltaan 35 mm olevan läppää kääntävän kara-akselin laskennalliseksi pituudeksi 350 mm. Pituus sisältää karkean arvion myös läpän, kara-akselien kiinnitysten (läppään) ja vapaan karan pienen kuormittuvan osan jouston. Oletetaan siis, että jumittumiskohta on vapaan karan sisemmässä laakerissa. Maksimimomentiksi eli jumittumisen purkautumismomentiksi käsipyörän akselille otetaan 160 Nm, joka on samaa luokkaa tai hieman suurempi, kuin käsipyörän sokan leikkautumislujuus.

Kun kierukkavaihteen välitys on 40 ja hyötysuhde arviolta 0,50 yksipäiselle kierukalle (liukulaakeroidulle ehkä jopa alempi), niin saadaan kara-akselin momentiksi 3200 Nm. Tämä synnyttää karalle varsin huomattavan n. 400 N/mm^2 leikausjännityksen sekä 6° kiertymän. Vastaavasti käsipyörän akseli kiertyisi $6^\circ \times 40 = 240^\circ$.

Näin suurta käsipyörän akselin kiertoa on vaikeahkoa saada aikaan putkipihtien kertakierroilla. On kuitenkin huomattava, että kierukkavaihte on yksipäisenä ruuvina ja lisäksi liukulaakeroituna ns. itsepidättävä eli käsipyörän akseli ei pyöri kara-akselista kääntämällä. Tällöin käsipyörän akselia putkipihdeillä käännettäessä se ei palaudu (jouta takaisin) vaikka ote akselilta irrotetaan. Avaaja voi kuvitella venttiililäpän liikkuvan kiertyessään käsipyörän akselia esim. $60^\circ \dots 90^\circ$ kerrallaan, mutta todellisuudessa kara-akseli on vain kiertynyt kimmoisesti, kunnes sitten lauennut kerralla jumittumiskynnyksen ylittymisen jälkeen. Laukeamisessa on vuotorako voinut syntyä kerralla, koska havaittu asentokulma oli 9° ja raon muodostumisen on arvioitu alkavan noin puolella tästä kulmasta.

Kara-akselin joustoon varautuva kimmoenergia on yllä saaduilla arvoilla n. 170 J. Lyhyt kiertymälaskelma on esitetty tarkemmin viitteessä /6/. Jouston määrittämiseksi luotettavammin, olisi joko tehtävä FEM-analyysi, tai vielä paremmin ja huokeammin, mitattava liikejärjestelmän jousto ja kierukkavaihteen hyötysuhde ehjistä venttiilistä.

Myös jumittumisen laukeamisessa syntyvää hankaustyyppistä lämpötilan nousua voidaan arvioida laskennallisesti. Oletetaan, että heti laukeamisen alussa hankausmomentti putoaa tiet-

tyyn arvoon ja pysyy siinä myös koko liikahtamiskiertymän ajan. Ensiksi todetaan, että tapauksissa, joissa värähtelysteemiin vaikuttaa vakiovoima, on jaksonaika yhtä suuri kuin ilman vaimentavaa momenttia (vain värähtelyn amplitudi muuttuu). Näin ollen liikahtuksen kesto purkaussuuntaan (siis suunnan vaihtumiseen tai pysähtymiseen saakka) on värähtelysteemin ensimmäisen puolijakson pituinen. Käyttämällä venttiililautasen hitausmomentille laskennollista bruttoarvoa $0,1085 \text{ kgm}^2$ ja karan vääntöjousivakiolle edellisestä laskelmasta saatua arvoa 30476 Nm , muodostuu liikkeen kestoksi $0,0060 \text{ s}$. Toiseksi, ääriarvona saadaan johdetuksi luonnollinen tulos, että yhden puolijakson aikana kehittyy hankaukselle maksimityö määrä, jos vastustava vakiomomentti on puolet esijännitysmomentista. Tällöin liike pysähtyy juuri kara-akselin jännityksettömään tilaan ja vaimennustyö on yhtä suuri kuin akseliin varastoitunut energia. Sama tulos pätee myös muille kuin vakiomomenteille, jos loppuehdot vain omat samat.

Näillä oletuksilla hankaukseen kohdistuva keskimääräinen teho on siis $170 \text{ J} / 0,006 \text{ s} = 28300 \text{ W}$. Jos hankauspinta-ala on 1 cm^2 , niin tehotiheys on silloin siis 28300 W/cm^2 eli kumpaakin osapuoleen johtuu 14150 W/cm^2 . Seuraavissa taulukoissa 5 ja 6 esitetään hankauspinnan laskennollisia lämpötilannousuja eri pinta-aloille sekä ruostumattomalle teräkselle että tyypilliselle rakenneteräkselle. Tehotiheydet tarkoittavat hankausparin välissä syntyvää tehoa, siis kokonaispintatehoa.

Ruostumaton teräs $15 \text{ W} / \text{Km}$, $500 \text{ J} / \text{kgK}$. Hankausenergia 170 J , kesto $0,006 \text{ s}$						
$A (\text{cm}^2)$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$q_{\text{tot}} (\text{W/cm}^2)$	56600	28300	14150	9433	7075	5660
$\Delta T_p (\text{K})$	3224	1612	806	537	403	322

Tauluko 5 Läpän kara-akselin jumittumisen purkautumisessa kehittyviä *laskennollisia* pinta-lämpötilannousuja ruostumattomalle teräkselle kun laukeamisenergia jakautuu kulloisellekin pinta-alalle tasan. Oletettu vakiona pysyvä vastustava hankausmomentti sellaiseksi, että liikkeen pysähtyessä akseli on jännityksetön.

Rakenneteräs $40 \text{ W} / \text{Km}$, $460 \text{ J} / \text{kgK}$. Hankausenergia 170 J , kesto $0,006 \text{ s}$						
$A (\text{cm}^2)$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$q_{\text{tot}} (\text{W/cm}^2)$	56600	28300	14150	9433	7075	5660
$\Delta T_p (\text{K})$	2058	1029	515	343	257	206

Tauluko 6 Läpän kara-akselin jumittumisen purkautumisessa kehittyviä *laskennollisia* pinta-lämpötilannousuja tyypilliselle rakenneteräkselle kun laukeamisenergia jakautuu kulloisellekin pinta-alalle tasan. Muuten oletukset samat, kuin taulukossa 5.

Esitetyt arvot ovat oletuksista johtuen tiettyjä ääriarvoja, mutta eivät välttämättä absoluuttisia. Samoin on huomattava, että kitkateho ei yleisessä tapauksessa jakaudu koko pinta-alalle tasan. Näistä seikoista huolimatta tuloksia voi käyttää todellisen tapauksen hahmotuksen apuna.

Huomattava on, että tämän tyyppisessä hankausparissa, kiertyvä akseli holkissa, kuumat pinnat eivät tapahtuman aikana paljastu lainkaan. Jos kuitenkin pinnoissa saavutetaan korkeita lämpötiloja ja otetaan vielä huomioon tehon epätasaiset jakaumat, niin tuntuisi varsin mahdolliselta, että tapahtumassa voisi laakerikuoresta irrota kuumia kappaleita tai raosta nousta esiin sulaa metallia.

Koska metallin syttymiseen ja jatkuvaan palamiseen tarvitaan varsin korkea happipitoisuus, olisi kuumen metallin päästävä välittömästi hapen kanssa tekemisiin, jotta palo voisi alkaa suoraan ilman välivaiheita. Nyt kuitenkin on todennäköistä, että avaushetkellä venttiilin akseli-
lipuoli on ollut lähes normaalin ilma-atmosfäärin ympäröimä. Puhdasta happea pääsee kohtaan vasta sitten, kun avautuneista raoista suihkuava puhdas happi pääsee pyörteilyn kautta kunnolla sekoittamaan ja huuhtomaan läpän alapuolisen alueen. Tämä kestää kuitenkin huomattavasti kauemmin, esim. 2 ... 3 s, kuin mikä on kuumennuksen jäähtymisaika. Esimerkiksi taulukon 5 tapauksessa, jossa pinta-ala on 1 cm^2 , on lämpötilan nousu tipahtanut 0,05 s kohdalla jo arvoon 290 K ja 0,5 s kohdalla se on enää vain 89 K.

Sensijaan ei-metallisille aineille, jotka syttyvät myös ilmassa, on lämpötilojen nousu useimmissa taulukon tapauksissa riittävä. Jos läsnä on vielä pölymäistä palavaa materiaalia, niin syttymismahdollisuudet kasvavat entisestään.

Jos kuvitellaan koko laukeamisenergian 170 J kohdistuvan kokonaisuudessaan yhteen pallo-
maiseen kappaleeseen ja vaaditaan sille 1000 K:n lämpötilan nousu, niin kappaleen halkaisijaksi saadaan n. 4,5 mm. Sama tilavuus muodostuu esim. 8 kappaleesta, joiden halkaisija on puolet edellä mainitusta eli 2,25 mm. Osa työstä kohdistuu todellisuudessa myös muihin, kun irtopartikkeleihin, mutta joka tapauksessa muutaman, suuruudeltaan 2...3 mm olevan kuumen irtopartikkelin synty näyttäisi tämän valossa hyvin mahdolliselta.

7.4 Plastinen muodonmuutos tai murtuminen syttymislähteenä

Jos lasketaan tavalliseen hitaan plastisoitumisen aiheuttama lämpötilan nousu esim. pehmeässä lämpöeristetyssä teräksessä, niin havaitaan pian, että se on vain muutamia kymmeniä asteita. Tilavuustehoa rajoittaa nimittäin aineen lujuus, esim. myötöjännitys. Tällainen nousu tuskin voi aiheuttaa syttymistä siitäkään huolimatta, että oksidikerros pinnalla rakoilisi.

Sensijaan nopeissa murtumissa, itse murtumakohdassa, aine käyttäytyy eri tavoin ja nousu voi olla selvästi korkeampi. Suurehkoja lämpötilan nousuja esiintyy mm. haurasmurtuman nopeasti kasvavan särön kärjessä. Murtumaan liittyy myös samalla puhtaan metallipinnan paljastuminen. Systemaattista koeteltua tietoa aiheesta ei näytä kuitenkaan olevan, ainakaan helposti, saatavissa.

Teräsköysien murtovetokokeissa on havaittu suoja- tai voiteluöljyjen syttyneen palamaan köyden katketessa. Tätäkään mekanismia tuskin on tutkittu loppuun saakka. Huomattavaa kuitenkin on, että kovaksi vedetyn teräslangan katketessa 'plastisoitumisalue' on hyvin pieni, jolloin siihen purkautuu nopeasti myös osa koko köyden kimmoenergiasta ja tehotiheys voi olla näin hyvinkin suuri.

Huomattakoon vielä lisäyksen luonteisesti, että lastuavassa työstössä saavutetaan helpostikin esim. 700 °C lämpötiloja. Korkeimmat arvot näyttävät sijoittuvan kohtiin, jossa irtoava lastu suurella paineella hankaa terää vasten.

Korkeiden lämpötilojen yleinen esiintymismahdollisuus nähdään selvästi siinä, että tietyissä murtuma-, hankaus- ja lastuamistapahtumissa (esim. hiominen kuivana suurella leikkuunopeudella) esiintyy kipinäointia eli irronneita kuumia hiukkasia.

7.5 Syttymisolosuhteista ja palon kehittymisestä

Kitkakuumennuksen sytyttämismahdollisuuksista puhuttaessa on syytä muistaa, että useimmiten metallin jatkuvaan palamisen hapessa vaaditaan voimakas virtaus. Ohuet rakenneosat, jotka ehtivät kumentua joko alkupalamisen tai avustavan teholähteen takia voivat mahdollisesti jatkaa palamistaan myös seisovassa hapessa. Tällainen rakenneosa saattaisi olla po. läppäventtiilin metallinen suojatiiviste. Tiivisteiden, levynpaksuus viimeisten tietojen mukaan n. 0,30 mm, lämpenemiseen kokonaan läpi toispuolisen lähteen vaikutuksesta tarvitaan aikaa vain n. 0,025 s, joten hyvinkin lyhytaikainen virtaus ja pintapalaminen tai riittävän tehokas hankaus kumentaa sen nopeasti. Toinen kysymys on, miten palo voisi jatkua massiivisempiin rakenneosiin, jos paine tasaantuu ja virtaus lakkaa esim. 20 ... 50 sekunnissa. Aikaväli on kuitenkin riittävä esim. pian venttiilin jälkeen syttyneen (palavasta kohdasta virtauksen mukana suihkuava sula sytyttää helposti muita pintoja) putken seinämän läpipalamiseen, jolloin putki puolestaan puhkeaa ja virtaus pääsee jatkumaan. Pelkkä 6 mm paksun seinämän lämpiäminen kokonaan läpi kestää hiiliteräksellä n. 3,2 s ja ruostumattomalla n. 9,5 s (toinen pinta saavuttanut 90 % kuumennetun pinnan lämpötilan porrasmuutoksesta eli Fourierin luku n. 1,0). Pinnan palaessa ja aineen poistuessa siitä tunkeuma on vielä nopeampi. Eri aikavakiot ovat siis periaatteessa sovitettavissa toisiinsa.

Jos palo olisi saanut alkunsa metallitiivisteiden kitkakuumennuksesta, tarvitaan myös selitys jumittumiselle ja mielellään myös korkealle metallitiivisteiden pintapaineelle. Eräs syy voisi olla lautasen ylikiertyminen sulkuasennossa, jolloin yhtenäinen tiiviste jännittyisi vetorenkana lautasen tiivistepinnan ympärille. Tässä tilanteessa tosin pintapaineet jakautuisivat melko tasaisesti koko kehälle, mikä kuitenkin ei poista sitä mahdollisuutta, että itse takertuminen olisi rajoittunut esim. vain yhteen tiettyyn kohtaan. Mahdollisuus sille, että ylävirran paine työntäisi metallitiivisteiden tiukasti lautaseen kiinni, edellyttäisi ensin sen tiivistymistä jonkun prosessin kautta. Muita käytöstä poistettuja, palaneen venttiilin kanssa samoissa putkistoissa olleita venttiilejä tutkittaessa havaittiin, että lautasen ja metallitiivisteiden väliin jää pieni rako sulkuasennossa /1/.

Eräs vaihtoehto on, että venttiilin varsinainen PTFE:stä (teflon, fluon) valmistettu tiiviste on osallistunut palon syttymiseen tai kehittymiseen. Koska asiasta on vaikea sanoa mitään puhtaasti termodynaamisen analyysiin liittyen, sitä ei pohdita tässä yhteydessä juuri tämän enempää. Suurehkoissa 138 baarin paineissa on PTFE:n syttymislämpötilaksi hapessa mainittu n. 470 °C.

Massiivisemmista hankauspareista olisi luonnollinen vaihtoehto venttiililautanen ja venttiilin runko (jos toinen olisi pidätinrenkas, niin metallitiiviste olisi välissä). Tällainen kosketus voisi periaatteessa esiintyä missä tahansa kohdassa lautasen kehää, jolloin saavutettaisiin helposti suuri säde eli suuri momentti ja suuri liukunopeus. Vaihtoehto edellyttää kuitenkin merkittävää venttiilin vaurioitumista. Eräs mahdollisuus olisi lautasen siirtyminen kara-akselinsa suunnassa.

Jos kara-akselin säteislaakeri olisi vaurioitunut tai leikannut kiinni, niin siinäkin voisi siis syntyä tarvittava kosketus. Kontaktin pitäisi olla kuitenkin varsin luja, että sillä voisi selittää venttiilin jumiutumisen, sillä kara-askelin halkaisija on vain 35 mm. Samoin nopeus riuhtaistessa jäisi samasta syystä pieneksi. Jos kara-akseli kiertyisi käsipyörän 90° vastaavan kulman hieman alle 0,1 sekunnissa, niin kosketuksessa, jonka leikkauslujuus olisi 1000 N/mm², syntyisi tällä nopeudella pintatehoa n. 1000 W/cm² eli lämpötila nousisi vain runsaat 200 K. Merkittävästi nopeammassa liikkeessä tai sitten tehon kohdistuessa johonkin esim. muokkauksessa syntyneeseen pienempään hiukkaseen, lämpötilan nousu olisi luonnollisesti korkeampi. Jumittumisen laukeamisessa kehittyisi em. kohonneella leikkauslujuudella kokonaispin-

tatehoa keskiarvona n. 30000 W/cm^2 , jolloin lämpötilan nousu olisi rakenneteräkselläkin yli 1000 K , runsasseosteisella ruostumattomalla teräksellä yli 1600 K . Näin korkeata leikkauslujutta jumittumistartunnan laukeamisen aikana tuskin voi esiintyä, mutta jo puolella tästä tehosta saavutetaan vielä varsin korkeita keskimääräisiä arvoja. Syttymistä voisi merkittävästikin auttaa alueella mahdollisesti esiintyvä PTFE-puru ja paljastunut liimakerros.

Jos venttiiliä oli lämmitetty avausyritysten yhteydessä, niin kohonnut lämpötila oli avuksi myös kaikissa mekaanisissa syttymisketjuissa, erityisesti nopeasti jäähtyvien lähteiden tai alueiden suhteen.

Eräs merkittävä ero venttiilipaloja tarkasteltaessa verrattuna referenssinä hyvin tunnettuun polttoleikkaukseen on, että hapen paine eli samalla sen (molekyyli)tiheys venttiilisovelluksen palavissa kohdissa on usein huomattavasti suurempi. Polttoleikkauksessa vallitsee railossa vain n. ympäristön eli 1 baarin paine. Sensijaan venttiilin raossa kriittisen virtauksen aikana on paine n. 18 baaria, virtauksen yläpuolella jopa 35 baaria. On siis odotettavissa, että alkuun päässyt palaminen voi olla paikoitellen jopa suuruusluokaltaan rajumpaa ja nopeammin ainetta poistavaa kuin polttoleikkaus. Lisäksi myös virtausnopeudet voivat olla joissain venttiiliraon kohdissa suuremmat kuin polttoleikkaurailossa.

Teknisessä kirjallisuudessa ja mm. venttiilien valmistajien sivuilla todetaan alkuun päässeeseen palon olevan metalleilla hapessa raju. Erään yleisen tason selitykseksi syttymissyylle mainitaan paikallinen korkea lämpötila. Syttymisen vaikeus tavallisimmilla metalleilla vaikeimmasta helpompaan ovat (www.fisherregulators.com):

- kupari ja kuparimetallit, nikkelin ja kuparin seokset
- ruostumaton teräs (austeniittinen)
- hiiliteräs
- alumiinit.

Palamisen rajuus heikommasta voimakkaampaan on muuten sama, paitsi että austeniittinen ruostumaton teräs palaa rajummin kuin hiiliteräs. Syinä ilmiöön saattavat olla, että tiiviimmän ja kimmoisemman oksidikalvonsa takia ruostumaton syttyy vaikeammin, mutta palaa taas paremmin mm. siksi, ettei siinä synny hapen diffuusiota hidastavia kaasumaisia palamistuotteita kuten hiilipitoisella teräksellä.

8 YHTEENVETO

Kaasun puristuessa po. happilinjassa vallitsevien parametrien ja reunaehtojen puitteissa, voi, esim. suljettuna olleen putkenosan nopean täyttymisen yhteydessä, esiintyä lämpötiloja, jotka ylittävät selvästi mm. hiilivetyjen tyypilliset itsesyttymislämpötilat $240 \dots 595 \text{ }^\circ\text{C}$. Putkistossa eikä venttiilissä ei ole kuitenkaan saatujen tietojen eikä havaintojen mukaan ollut hiilivetyjä tai muita sytykkeinä toimivia aineita tai epäpuhtauksia. Lisäksi venttiilin avaamisen ja kaasun puristumisen yhteydessä korkeita lämpötiloja ei voi esiintyä muualla kuin suljetun 22 m pitkän putkenosan toisen, suljettuna olleen venttiilin luona tai mahdollisten liitäntälinjojen päissä. Kuitenkin palo on mitä ilmeisimmin alkanut itse läppäventtiilissä tai sen välittömässä läheisyydessä, millä alueilla kaasuprosesseista aiheutuu korkeintaan n. $140 \text{ }^\circ\text{C}$:n (415 K) lämpötiloja.

Myöskään kaasun virtaus, niin ali- kuin ylisooninenkaan, ei voi aiheuttaa minkäänlaista merkittävää lämpötilan kasvua venttiilissä tai sen lähellä. Pikemminkin tällä alueella lämpötilan-

muutos virtauksen itsensä takia merkitsee lämpötilan laskua. Näin myös rakenteissa niissä kohdin, joissa kylmä suihku koskettaa suoraan pintoja.

Eräs tapahtumaketjussa oleellinen termodynaaminen tekijä on suljettuna olleen putkistonosan täyttymisaika, kun läppäventtiili avataan raolleen tai tasauslinjan palloventtiili kokonaan. Laskemalla päädyttiin tulokseen, että todennäköisin täyttymis- eli paineen tasaantumisaika on ollut n. 15 ja 50 s välillä avaamistavasta riippuen.

Laskemalla venttiilin kara-akselien kiertymä, joka vastaa arvioitua jumittuneen venttiilin avaushmomenttia käsipyörän akselilla, päästiin tulokseen, että kara-akseli voi mahdollisesti kiertyä yläpäästään jopa 6° ilman, että jumittuminen purkautuu. Tällöin jumittumisen lauetessa virtausrako muodostuu mahdollisesti kerralla, jolloin vastaavasti tasaantumisaika on ehkä vain n. 13 s. Tässä vaihtoehdossa edellytetään käytännössä, että venttiilin kierukkavaihe on ns. itsepidättävä eli käsipyörän akselia voidaan kiertää useammassa vaiheessa niin, ettei se välillä pyörähdä takaisin. Myöhemmin itsepidättyvyys ja venttiilikaran kiertyminen jopa yli 6° on varmistettu kokeellisesti.

Sen oletuksen tarkistamiseksi, että riittävän nopeasti virtauksen mukana liikkuvat kiinteät hiukkaset sytyttäisivät törmäyskohteensa, laskettiin karkeahkoin virtausoletuksin hieman avautuneen venttiilin raossa kiihtyvien hiukkasten nopeuksia. Tulokseksi saatiin, että ainakin kooltaan 0,2 mm ja sitä pienemmät hiukkaset ehtivät kiihtyä jo raon matkalla rajanopeuden 50 m/s yli. Tietyin ehdoin pienimmät hiukkaset, 0,1 mm tai alle, voivat kiihtyä aina nopeuteen 200 m/s tai ylikin.

Venttiilin syttymistä suoraan avauskiskaisusta tutkittiin arvioimalla siitä aiheutuvan kahden metalliosan välisen kitkakuumennuksen suuruusluokkaa sekä laskemalla numeerisesti saavutettavia pintalämpötiloja. Päädyttiin tulokseen, että ruostumattomalla teräksellä esim. $0,50 \text{ cm}^2$ suuruisen alueen pintalämpötila voi nousta jopa enemmän kuin 1000 K lähtölämpötilan yläpuolelle (pintateho 5000 W/cm^2) pelkästään kiskaisulla käsipyörän akselilta. Tapauksessa, jossa jumittuneen venttiilin karan kiertymään varastoitunut potentiaalienergia laukeaa kerralla saavutetaan laskennallinen 1000 K nousu ruostumattomalla teräksellä n. $1,8 \text{ cm}^2$ ja rakenneteräksellä n. $1,0 \text{ cm}^2$ pinta-alalla. Käytännön kokemuksesta tiedetään lisäksi, että periaatteessa hyvinkin pienellä työmäärällä voi kiinnileikkautumistyyppisissä tapauksissa pinta pieniltä alueilta sulaa. Oleellinen kysymys tällaisessa tapauksessa kohdistuukin siihen, voiko pieni, liukumisessa paljastuva, veres, mutta nopeasti jäähtyvä kuuma läikkä tahi irtoava kuuma hiukkanen aiheuttaa kasvavan palon suuripaineisessa puhtaassa hapessa. Tehtävää voi lähestyä joko laskennallisesti tai kokeellisesti. Kumpakaan ei ole tiettävästi vielä tehty.

VIITTEET

- /1/ Rahka, K.: Palaneen happiventtiilin ja toisten samanlaisten toimintakuntoisten venttiilien tutkimuksen kuluessa henkilökohtaisesti saatua tutkimustietoa ja mittaustuloksia. VTT Tuotanto.
- /2/ Eerikäinen, L.: Termodynamiikkaohjelma PUHALLUS. *Ohjelma tarkoitettu säiliöistä, erilaista ohjattavista laitteista ja koneikoista sekä lämpörakenteista muodostuvien järjestelmien termodynaamisten ja virtausteknisten prosessien numeeriseen analyysiin. Tässä käytetty ohjelman versiota pu204.*
- /3/ Eerikäinen, L.: PALEUS 2.1, ohjelma kappaleen lentoradan numeeriseksi ratkaisemiseksi väliaineessa. *Kappaleen vastuskerroin kuvattu Stokesin alueelta Reynoldsin lukuun $n. 300\,000$ saakka. Soveltuu siten myös pienimmille hiukkasille.*
- /4/ Eerikäinen, L.: KAPALO 1.0, lämpölähdekaavojen numeeriseen integrointiin perustuva ohjelma pintalämpötilan ja lämpötilajakauman laskemiseksi homogeenisessa materiaalissa. *Ohjelma laadittu alkuperäisenä tarkoituksena sijoittaa se osaksi pintapalamisohjelmaa.*
- /5/ Eerikäinen, L.: JOH DU 1.04, numeerinen yksidimensioinen ohjelma lämpötilajakaumien, lämpövirtojen ja jännitysten laskemiseksi kappaleen diskreeteissä pisteissä. *Käytetty tässä yhteydessä rinnakkais- ja varmistuslaskentaan.*
- /6/ Eerikäinen, L.: Venttiilikaran ja käsipyörän akselin kiertymä. Omamuistio 3.12.2004, VTT Prosessit.

VENTTIILIKARAN JA KÄSIPYÖRÄN AKSELIN KIIRTYMÄ

Seuraavassa esitetään arviolaskenta happiventtiilin liikuntaelimien joustoksi ja kiertymiksi.

Venttiilikara:

$$d = 35 \text{ mm}$$

$$l = 350 \text{ mm (arvioitu ekvivalentti pituus, joka sisältää läpän, kiinnitysten ja toisiokaran alkuosan jouston. Kiinnitys oletettu siis toisiokaran sisempään laakeriin)}$$

$$G = E / 2(1 + \nu) = E / 2,6 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 / 2,6 = 0,77 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (liukumoduli)}$$

$$\text{Vääntöneliömomentti} \quad I_p = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi \cdot 35^4}{32} = 139 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$\text{Vääntövastus} \quad W_p = I_p / r = 139 / 17,5 \cdot 10^3 = 7923 \text{ mm}^3$$

Momentti käsipyörän akselilla $M_{kp}=160 \text{ Nm}$ ($\cong 1,5 \times$ sokkaruuvien murtoraja), jolloin venttiilin käyttökaralla, jos hyötysuhteeksi otetaan 0,5 ja välitys on 40, momentti on:

$$M_{ka} = \eta i M_{kp} = 0,5 \cdot 40 \cdot 160 \text{ Nm} = 3200 \text{ Nm}$$

Karan kiertymä (radiaaneina)

$$\varphi_{ka} = \frac{M_{ka} \cdot l}{GI_p} = \frac{3200 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \cdot 350 \text{ mm}}{0,77 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 139 \cdot 10^3 \text{ mm}^4} = 0,105 = 6,0^\circ$$

$$\text{Käsipyörän akselin kiertymä } \varphi_{kp} = i \cdot \varphi_{ka} = 40 \cdot 6,0^\circ = 240^\circ$$

Karan max. leikkausjännitys

$$\tau = \frac{M_{ka}}{W_p} = 404 \text{ N/mm}^2 \text{ (aika korkea!)}$$

$$\text{Karaan kimmoisesti varastoituva pot. energia } E_{\text{pot}} = \varphi_{ka} M_{ka} / 2 = 0,105 \cdot 3200 \text{ Nm} / 2 = 168 \text{ J}$$

LIITE 4

PTFE:n palaminen

Risto Lautkaski

PTFE:N PALAMINEN

1 OMINAISUUKSIA

Polytetrafluorieteeni PTFE on tetrafluorieteenin suoraketjuinen polymeeri. Ketjut ovat erittäin pitkiä ja molekyylimassa poikkeuksellisen suuri: 10^6 – 10^7 . Hiilen ja fluorin välinen sidosenergia on erittäin suuri, mutta ketjujen välinen sidosenergia on erittäin pieni. Tetrafluorieteeni polymeroidaan vedessä. Muodostuneissa PTFE-hiukkasissa on 92–98 % kiteitä ja loput amorfista ainetta. Hiukkasten sulamislämpötila on 342 °C. Kaupalliset PTFE-laadut valmistetaan sulattamalla hiukkaset ja niiden kideosuus vaihtelee molekyylimassasta ja jäähdytysnopeudesta riippuen 45–75 %. Kerran sulatetun PTFE:n sulamislämpötila on 327 °C. Kun PTFE sulaa, muodostuu amorfista ainetta, jolla on erittäin korkea viskositeetti: 10–100 GPa·s lämpötilassa 380 °C. Pyrolyysin vaikutuksesta amorfisen PTFE:n viskositeetti pienenee (Ullmann 1988).

PTFE:n kitkakerroin on poikkeuksellisen pieni. Kuorman kasvaessa lepokitka pienenee ja on liikekitkaa pienempi. Kuormalla 3,4 MPa lepokitkakerroin on 0,08 ja nopeudella 900 m/s liikekitkakerroin on 0,01. PTFE:n kulutuksen kesto voidaan huomattavasti parantaa täyteaineilla. Esimerkiksi, jos täyteaineena on 25 % lasikuitua, kulutuksen kesto kasvaa tekijällä 190. Täyteaineet eivät olennaisesti muuta muita mekaanisia ominaisuuksia (Ullmann 1988).

2 ITSESYTTYMISLÄMPÖTILA

Paciorek ym. (1973) käyttivät menetelmää, jossa PTFE-levy (halkaisija 25 mm, paksuus 1,3 mm) oli lämmittimen päällä ja siihen puhallettiin ilmaa tai happea ylhäältä päin. Tällä tavalla levyyn muodostettiin lämpötilagradientti. Kun lämmittimen ja kaasun lämpötilat olivat yhtä suuret, lämpötilagradienttia ei muodostunut. Tässä tilanteessa saatiin PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi ilmassa 512 °C ja hapessa 575 °C.

Ikeda (1983) antaa differentiaalisella termoanalyysillä mitatun PTFE:n itsesyttymislämpötilan arvoksi hapessa 512–527 °C.

Barthelemy ja Vagnard (1988) ovat määrittäneet L'Air Liquiden käyttämällä testausmenetelmällä kahdeksan PTFE:stä valmistetun happiletkun materiaalin itsesyttymislämpötilan. Tulokset vaihtelivat 472–500 °C.

Hsieh ym (1996) ovat määrittäneet PTFE:n itsesyttymislämpötilan hapessa standardin ASTM G 72 mukaisella testillä. Testi tehdään tavallisesti puhtaassa hapessa, jonka paine on 103 bar. Testattavan nesteen tai kiinteän aineen näytettä kuumennetaan nopeudella 5 °C/min. Näytteen katsotaan syttyneen, kun sen lämpötila nousee nopeasti vähintään 20 °C (Babrauskas 2003). Hsieh ym. (1996) saivat tällä tavalla PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi 434 °C.

Bryan ym. (2000) ovat määrittäneet mm. PTFE:n itsesyttymislämpötilan ilmassa, hapessa sekä hapella rikastetussa ilmassa standardin ASTM G 72 mukaisella testillä. Kaasun paine oli 34, 69 ja 103 bar. Itsesyttymislämpötila oli ilmassa käytännöllisesti sama kuin hapessa: ilmassa 417 °C ja hapessa 418 °C (34 bar) sekä ilmassa 438 °C ja hapessa 435 °C (103 bar). Hapella rikastetussa ilmassa mitattiin hieman korkeampia itsesyttymislämpötilan arvoja. Korkein itsesyttymislämpötila mitattiin hapen pitoisuudella 50 %: 429 °C (34 bar) ja 441 °C (103 bar).

Grafiitilla lujitetun PTFE:n itsesyttymislämpötilasta ei löytynyt mittaustuloksia. Kun polymeerien palonkestävyyttä parannetaan epäorgaanisilla täyteaineilla, kuten alumiinitrihydraatilla $\text{Al}(\text{OH})_3$ tai magnesiumhydroksidilla $\text{Mg}(\text{OH})_2$, niiden itsesyttymislämpötila nousee. Vastaavasti pehmentimet alentavat itsesyttymislämpötilaa (Barnes ym. 1996). Hsieh ym. (1994) ovat mitanneet fluorattuja hiilivetyjä sisältävien synteettisten kumien itsesyttymislämpötilan standardin ASTM G 72 mukaisella testillä hapessa 103 baarin paineessa. Itsesyttymislämpötila nousi $1,82\text{ }^\circ\text{C}$, kun lisäaineena käytetyn nokimustan pitoisuus kasvoi yhden painoprosentin. Toisaalta, kun polymeerien ja muiden orgaanisten aineiden pitoisuus kasvoi yhden painoprosentin, itsesyttymislämpötila laski $1,82\text{ }^\circ\text{C}$. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että nokimusta muodostaa pysyviä oksideja ja siten hidastaa polymeerien kaasuuntumista. Julkaisussa ASTM G 63 on annettu viiden lasikuidulla lujitetun PTFE-tuotteen itsesyttymislämpötilat. Yhden tuotteen itsesyttymislämpötila oli $360\text{ }^\circ\text{C}$ ja muiden yli $427\text{ }^\circ\text{C}$ ($800\text{ }^\circ\text{F}$), toisin sanoen ne eivät vielä syttyneet tässä lämpötilassa.

Aineen itsesyttymislämpötila riippuu mm. käytetystä mittausten menetelmästä. Kun testillä saatua itsesyttymislämpötilaa sovelletaan käytännön tilanteeseen, on pidettävä mielessä, että (ASTM G 63):

1. Testitilanteesta poikkeava kappaleen muoto ja lämpötila voivat nostaa tai laskea itsesyttymislämpötilaa.
2. Muut järjestelmässä olevat aineet sekä epäpuhtaudet voivat katalysoida aineen hapettumista ja siten laskea itsesyttymislämpötilaa.
3. Jos aineen pinta-alan ja tilavuuden suhde on suuri (esimerkiksi jauhemaiset aineet), sen itsesyttymislämpötila on tyypillisesti testin tulosta alempi.

3 PALAMINEN

Kuumennettaessa polymeerien molekyyliketjut katkeilevat muodostaen erilaisia kemiallisia yhdisteitä. Pienemmät molekyylit haihtuvat välittömästi, kun taas suuremmat pysyvät jonkin aikaa kiinteässä faasissa. Tänä aikana ne hajoavat pienemmiksi molekyyleiksi, jotka haihtuvat. Kun kuumeneva polymeerikappale on kosketuksessa hapen kanssa, happea voi tunkeutua kappaleen pintakerrokseen ja happi voi olennaisesti vaikuttaa polymeerin hajoamisreaktioihin. Tämä on todettu esimerkiksi polyeteenillä (Beyler & Hirschler 1995).

Sekä ilmassa että työssä kuumennettaessa PTFE on erittäin stabiili. Pyrolyysi alkaa noin $440\text{ }^\circ\text{C}$:n ja on merkittävää $540\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Kun ohuita PTFE-kalvoja kuumennettiin tyhjiössä, tärkein hajoamistuote oli monomeeri C_2F_4 (Ullmann 1988). Kuumennettaessa PTFE-kalvoa työssä pyrolyysi alkoi lämpötilassa $473\text{ }^\circ\text{C}$ ja 1 % näytteestä oli hajonnut lämpötilassa $502\text{ }^\circ\text{C}$. Mahdollisesti todellinen hajoamistuote on CF_2 , joka muodostuu välittömästi kaasufaasissa. Kun kuumennettava PTFE on kosketuksessa hapen kanssa, monomeeria ei muodostu (Beyler & Hirschler 1995). Sen sijaan reaktiotuotteena on karbonyylifluoridi COF_2 , joka edelleen hajoaa hiilidioksidiksi CO_2 ja hiilitetrafluoridiksi CF_4 . Kun PTFE-nauhaa kuumennettiin hapessa, reaktiotuotteet lämpötilassa $450\text{ }^\circ\text{C}$ olivat CO_2 ja COF_2 sekä lämpötilassa $520\text{ }^\circ\text{C}$ lisäksi CF_4 . Nauha syttyi lämpötilassa $525\text{ }^\circ\text{C}$ (Shelley ym. 1993).

4 HAPPI-INDEKSI

Kaasuilla itsesyttymislämpötila kuvaa, millä edellytyksellä syttyvä kaasuseos voi syttyä kuumasta pinnasta. Tämän jälkeen palo leviää sytyvässä seoksessa ohuena liekkiäntamana. Nesteiden tapauksessa tarvitaan toinen testillä määriteltävä ominaisuus, leimahduslämpötila, kuvaamaan syttymisvaaraa. Nesteen pintalämpötilan tulee olla leimahduslämpötilaa korkeampi, jotta nesteen höyry muodostaa pinnan yläpuolelle sytyvän seoksen. Kun jokin syttymislähde sytyttää seoksen, neste alkaa heti palaa koko pinnaltaan. Jos pintalämpötila on leimahduslämpötilaa alempi, nestelammikko saadaan syttymään kuumentamalla se paikallisesti hieman leimahduslämpötilaa korkeampaan läm-

pötilaan. Tämän jälkeen palo leviää hitaasti koko lammikon pinnalle sitä mukaa, kun lämmin neste leviää pienemmän viskositeettinsa ansiota valumalla pinnalla.

Kiinteiden aineiden tapauksessa itsesyttymislämpötila riittää sytyttämään pienen ainemäärän testilaitteessa. Käytännön tilanteet poikkeavat testilaitteen olosuhteista ja, kuten edellä todettiin, erilaiset tekijät voivat laskea tai nostaa aineen itsesyttymislämpötilaa. Aineen syttymisen lisäksi on arvioitava myös palon leviämistä kiinteässä kappaleessa. Tämä riippuu monesta tekijästä. Paloa levittävät ennen muuta liekki ja kuumat palokaasut. Pystysuoralla pinnalla palo leviää nopeimmin ylöspäin sen vuoksi, että liekki ja palokaasut kuumentavat konvektio- ja säteilylämmönsiirrolla palavan alueen yläpuolella olevan pinnan syttymislämpötilaan. Palon syttymislämpötilan lisäksi on arvioitava, millä edellytyksellä palo voi levitä kiinteässä kappaleessa. Tähän tarkoitukseen on kehitetty erilaisia testausmenetelmiä.

Kun kiinteä aine palaa hapella rikastetussa ilmassa tai puhtaassa hapessa, liekin ja myös palokaasujen lämpötila nousee happipitoisuuden kasvaessa. Tämän vuoksi palo leviää sitä helpommin mitä korkeampi hapen pitoisuus on.

Happi-indeksi (limiting oxygen index tai oxygen index) tarkoittaa alinta happipitoisuutta, joka riittää ylläpitämään alun perin huoneenlämpöisen materiaalin palamista avoliekillä. Happi-indeksi otettiin vuonna 1966 käyttöön muovien syttyvyyden testaamiseksi ja vuonna 1970 testausmenetelmä määriteltiin standardilla ASTM D 2863. 1990-luvun lopulla ASTM:n standardi yhdenmukaistettiin standardin ISO 4589 kanssa (Hirsch 2003).

Standardin ASTM D 2863 mukaisessa testissä koekappaleena on puikko, joka sijoitetaan keskelle pystysuoraa putkea, jossa huoneen lämpötilassa oleva kaasuseos virtaa alhaalta ylöspäin nopeudella 4 ± 1 cm/s. Puikko sytytetään yläpäästään ja sen tulee palaa vähintään 3 minuutin ajan tai vähintään 50 mm:n pituudelta, jotta happipitoisuus katsotaan riittäväksi ylläpitämään palamista avoliekillä. Toistamalla testi eri happipitoisuuksilla saadaan selville testattavan materiaalin happi-indeksin arvo.

Happi-indeksin käyttöä puoltaa se, että testien toistettavuus ja mittaustulosten tarkkuus ovat erittäin hyviä. Menetelmää on kritisoitu sen vuoksi, että todellisuudessa kaasun lämpötila ja paine sekä materiaalin syttymistapa usein poikkeavat testin olosuhteista. Babrauskas (2003) korostaa, että standardin ASTM D 2863 mukaan määritetyn happi-indeksin yleistettävyyden on huono ja se on vain varauksin sovellettavissa.

Lämpötilan noustessa happi-indeksi pienenee. Halkaisijaltaan 3,2 mm:n PTFE-puikon happi-indeksi laski arvosta 99 % (20 °C) arvoon 77 % (125 °C) (Ikeda 1983). Myöhemmissä testeissä käytettiin puikkoa, jonka halkaisija oli 1,5 mm. Happi-indeksi oli huoneen lämpötilassa suurempi kuin 99,5 % ja lämpötilassa 93 °C se oli 85 % (Hirsch ym. 2003). Benning (1983) totesi, että jo 0,8 baarin ylipaine laskee happi-indeksin 80 %:iin. Paineen noustessa happi-indeksi laskee seuraavasti: 62 % (3,1 bar), 53,5 % (6,1 bar) ja 46 % (14,1 bar).

Koekappaleen sytyttämistapa vaikuttaa myös testitulokseen. Kaasun virtaussuunta alhaalta ylöspäin ja koekappaleen sytyttäminen yläpäästään valittiin testausmenetelmäksi helppouden ja tuloksen tarkkuuden vuoksi, vaikka näin ei saadakaan alinta arvoa happi-indeksille. Kun koekappale sytytettiin alapäästään, kuumat palokaasut virtasivat koekappaletta pitkin ja happi-indeksille saatiin puolta pienempiä arvoja. Kun halkaisijaltaan 3,2 mm:n PTFE-puikko sytytettiin alapäästään, happi-indeksille saatiin huoneen lämpötilassa arvo 43 % (Ikeda 1983). Halkaisijaltaan 1,5 mm:n puikolla saatiin happi-indeksin arvoksi huoneen lämpötilassa 49 % ja lämpötilassa 93 °C 41 % (Hirsch ym. 2003).

Happi-indeksi on siis suure, joka kuvaa happipitoisuuden vaikutusta palon leviämiseen kiinteässä kappaleessa. Se ei merkitse samaa kuin rajahappipitoisuus (limiting oxygen concentration), jolla

tarkoitetaan alinta happipitoisuutta, jossa tietty kaasu voi muodostaa syttyvän seoksen. Rajahappipitoisuus on keskeinen käsite inertoitaessa laitteita tai tiloja, joihin saattaa muodostua syttyvä seos. Simmons ja Wolfhard (1957) ovat määrittäneet eräiden kaasujen happi-indeksin testausmenetelmällä, jossa ilman happipitoisuutta laskettiin tyypeä lisäämällä, kunnes huokoisen puolipallonmuotoisen polttimeen liekki sammui. Näin määritetyt happi-indeksin arvot ovat lähellä kaasujen rajahappipitoisuutta (Werley 1988).

Kaasujen tapauksessa liekistä siirtyvä lämpö ylläpitää palamista, koska se kuumentaa seoksen syttymislämpötilaansa. Nesteiden ja kiinteiden aineen palaminen edellyttää, että liekki lisäksi höyrystää nestettä tai ylläpitää pyrolyysireaktioita kiinteässä aineessa. Koska nämä lämpöhäviöt vaikuttavat syttymisrajoihin, on odotettavissa, että nesteillä ja kiinteillä aineilla happi-indeksin arvon ja rajahappipitoisuuden erotus on suurempi kuin homogeenisella kaasuseoksella. Esimerkiksi bentseenin rajahappipitoisuus on 11,5 %. Simmons ja Wolfhardin (1957) testilaitteella (joka tehostaa lämmön siirtymistä liekistä palavaan aineeseen) happi-indeksille saatiin arvo 13,3 %. Toisella testimenetelmällä, jossa bentseeni oli kupissa, saatiin happi-indeksille arvo 16,4 % (Werley 1988).

Ullmannin (1988) mukaan "PTFE ei ylläpidä palamista ilmassa. PTFE:n happi-indeksi 96 % on erittäin korkea, toisin sanoen PTFE palaa vain lähes puhtaassa (96 %) hapessa." Tämä johtopäätös on ilmeisen väärä, koska siinä on samaistettu standardin mukaisella testillä saatu happi-indeksin arvo 96 % ja rajahappipitoisuus.

5 PALAMISLÄMPÖ

Lowrie (1983) esittää kirjallisuustietoja mm. PTFE:n palamislämmöstä, joka eri lähteiden mukaan on 4,2–5,9, 5,4, 6,1 tai 7,1 MJ/kg. Hsieh ym. (1996) ovat määrittäneet PTFE:n palamislämmöksi standardin ASTM D 240 mukaisella testillä 6,38 MJ/kg. Tämä on varsin pieni arvo hiilivetypolymeereihin verrattuna. Esimerkiksi polyeteenin palamislämpö on 46,65 MJ/kg (Hsieh ym. 1996).

6 PALAMISLÄMPÖTILA

Shelley ym. (1997) ovat tutkineet neljän polymeerin (mm. HD-polyeteenin ja PTFE:n) kykyä sytyttää metallipuikko puristetussa hapessa. Polymeerien koekappaleet olivat lieriöitä, joiden halkaisija oli 13 mm ja korkeus 6,4 mm. Metallipuikot (alumiini tai ruostumaton teräs AISI 316, halkaisija 3,2 mm, pituus 152 mm) oli sijoitettu pystyyn polymeerilieriön päälle. Lieriöt sytytettiin niiden vaipan uraan upotetulla sytytyslangalla. Kokeista otetuista videokuvista kävi ilmi, että HD-polyeteeni paloi diffuusioliekin kaltaisella liekillä, joka oli irti lieriön pinnasta. PTFE sen sijaan paloi pinnaltaan hehkupalona.

Tiedetään, että yksinkertaisen hiilivedyn palaminen voi sisältää yli 40 reaktiota. Niiden mallintaminen edellyttäisi kuitenkin kaikkien yhdisteiden ja radikaalien pitoisuuden mittaamista liekin eri osissa. Kokeissa pitoisuuksia mitattiin vain liekin ulkopuolella. Polymeerien palamista mallinnettiin yksinkertaistamalla reaktiokinetiikkaa ja kuvaamalla kaasujen termodynaamista tilaa neljällä tai viidellä muuttujalla. Tällä menetelmällä laskettujen palamislämpötilojen tarkkuutta ei arvioitu.

HD-polyeteenillä sytytettyjen alumiinipuikkojen palojäljet voitiin jakaa kahteen toisistaan selvästi erottuvaan osaan. Alemmassa osassa puikko oli hieman paksuuntunut tai pullistunut. Ylemmässä osassa pinnan oksidikalvo oli rypistynyt, mutta ehjä. Tämä johtui alumiinin sulamisesta ja valumisesta oksidikalvon sisällä. Kummankin osan maksimilämpötilat arvioitiin reaktioiden tasapainon sekä alumiinin (660 °C) ja alumiinioksidin (2054 °C) sulamislämpötilojen perusteella.

Liekin lämpötila laskettiin käytetyllä mallilla olettamalla, että alemmassa osassa oli rikas ja ylemmässä laiha pyrolyysituotteiden ja ilman seos. Hapen paineella 34 bar saatiin liekin lämpötilaksi

alemmassa osassa 1749 °C ja ylemmässä 2730 °C. Polymeeri paloi kokonaan, mutta alumiini ei palanut lainkaan.

PTFE:n tapauksessa ei näkynyt liekkiä eikä alumiinisauvoissa havaittu palojälkiä. Mallilla lasketut lämpötilat vastaavat PTFE:n pintalämpötilaa ja muodostuneet kaasut (CO_2 , COF_2 ja CF_4) ovat täysin hapettuneita. Hapen paineella 34 bar saatiin PTFE:n pintalämpötilaksi 1497 °C. Myös tässä tapauksessa polymeeri paloi kokonaan, mutta alumiini ei palanut lainkaan.

HD-polyeteeni sytytti ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistetun puikon palamaan osassa kokeita, kun hapen paine oli 69–690 bar. PTFE ei sen sijaan sytyttänyt puikkoa yhdessäkään kokeessa.

Tämän selitettiin johtuvan siitä, että HD-polyeteenin diffuusioliikki kosketti puikon alaosan pintaa. Lämmönsiirto liekistä metalliin tapahtui säteilyn ja kuumien kaasujen konvektion avulla. Sen sijaan lämmönsiirto PTFE:n pinnasta metalliin tapahtui johtumalla ja hapen konvektion vaikutuksesta, mitkä ovat paljon tehottomampia lämmönsiirtymisilmiöitä. Vaikka laskettu PTFE:n pintalämpötila oli teräksen sulamislämpötilaa korkeampi, suoritetut lämmönsiirtolaskut osoittivat, että puikon lämpötila ei ehtinyt kokeen aikana nousta teräksen sulamislämpötilaan eikä syttyminen siten ollut mahdollista.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

1. PTFE:n itsesyttymislämpötila on suunnilleen sama ilmassa ja hapessa. Itsesyttymislämpötilan arvo riippuu käytetystä mittausmenetelmästä.
2. Rakeisen PTFE:n itsesyttymislämpötila on alempi kuin testien kiinteiden kappaleiden.
3. PTFE:n happi-indeksin arvo riippuu olennaisesti liekin etenemissuunnasta. Standardin mukaisessa testissä happi virtaa ylöspäin ja koekappale sytytetään yläpäästään. Sytyttämällä koekappale alapäästään saadaan puolta pienempi happi-indeksin arvo.
4. PTFE:n happi-indeksin arvo ei ole PTFE:n rajahappipitoisuus. Toisin sanoen sen perusteella ei voi päätellä, millä hapen pitoisuuksilla PTFE voi palaa.
5. PTFE-kappale palaa hehkupalona ilman liekkiä. Polymeeriketjujen katketessa muodostuvat molekyylit hapettuvat kappaleen pinnalla tai pintakerroksessa.
6. Hapessa palavan PTFE:n pintalämpötilaksi on laskettu noin 1500 °C, joka on hieman teräksen sulamislämpötilaa korkeampi. Laskun tarkkuutta ei ole arvioitu. Ilmassa palavan PTFE:n pintalämpötila on teräksen sulamislämpötilaa alempi.

KIRJALLISUUSLUETTELO

ASTM G 63-99 1999. Standard guide for nonmetallic materials for oxygen service. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. 26 s.

Babrauskas, V. 2003. Ignition handbook. Issaquah, WA: Fire Science Publishers. S. 625–629. ISBN 0-9728111-3-3.

Barnes, M. A., Briggs, P. J., Hirschler, M. M., Matheson, A. F. & O'Neill, T. J. 1996. A comparative study of fire performance of halogenated and non-halogenated materials for cable applications. Part I Tests on materials and insulated wires *Fire and Materials*, vol. 20, s. 1–16. ISSN 0308-0501.

Barthelemy, H. & Vagnard, G. 1988. Ignition of PTFE-lined hoses in high-pressure oxygen systems: test results and considerations for safe design and use. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). *Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres*, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 289–304. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

Benning, M. A. 1983. Measurement of oxygen index at elevated pressures. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). *Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres*, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 68–83. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.

Beyler, G. L. & Hirschler, M. H. 1995. Thermal decomposition of polymers. Teoksessa: SFPE handbook of fire protection engineering. Second edition. DiNenno, Philip J. (toim.). Boston, MA: National Fire Protection Association & Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA. S. 1-99–1-119. ISBN 0-87765-354-2.

Bryan, C. J., Hirsch, D. B., Haas, J. & Beeson, H. D. 2000. Ignitability in air, gaseous oxygen, and oxygen-enriched environments of polymers used in breathing-air devices, final report. Teoksessa: Steinberg, T. A., Newton, B. E. & Beeson, H. D. (toim.). *Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres*, vol. 9. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 87–100. (ASTM Special Technical Publication 1395). ISBN 0-8031-2871-1.

Hirsch, D., Motto, S., Porter, A., Beeson, H. & Pedley, M. D. 2003. Issues related to the flammability assessment of polymers for hazard analyses of oxygen systems. Teoksessa: Steinberg, T. A., Beeson, H. D. & Newton, B. E. (toim.). *Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres*, vol. 10. West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 21–26. (ASTM Special Technical Publication 1474). ISSN 0066-0558.

Hsieh, F.-Y., Bryan, C. J. & Pedley, M. D. 1996. Communication: Autoignition temperature of carbon-filled fluoroelastomers at elevated oxygen pressure. *Fire and Materials*, vol. 18, s. 389–391. ISSN 0308-0501.

Hsieh, F.-Y., Stolfus, J. M. & Beeson, H. D. 1996. Note: Autoignition temperature of selected polymers at elevated oxygen pressure and their heat of combustion. *Fire and Materials*, vol. 20, s. 301–303. ISSN 0308-0501.

- Ikeda, G. K. 1983. Oxygen index tests to evaluate the suitability of a given material for oxygen service. Teoksessa: Werley, B. L. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 1. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 56–67. (ASTM Special Technical Publication 812). ISSN 0066-0558.
- Paciorek, K. L., Kratzer, R. H. & Kaufman, J. 1973. Oxidative thermal degradation of polytetrafluoroethylene. Journal of Polymer Science, Polymer Chemistry Edition, vol. 11, s. 1465–1473. ISSN 0360-6376.
- Shelley, R. M., Janoff, D. D. & Pedley, M. D. 1993. Effect of hydrocarbon oil contamination on the ignition and combustion properties of PTFE tape in oxygen. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 81–94. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.
- Shelley, R. M., Wilson, D. B. & Beeson, H. 1997. Combustion characteristics of polymers as ignition promoters. Teoksessa: Janoff, D. D. & Stoltzfus, J. M. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 6. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 223–238. (ASTM Special Technical Publication 1197). ISSN 0066-0558.
- Simmons, R. F. & Wolfhard, H. G: 1957. Some limiting oxygen concentrations for diffusion flames in air diluted with nitrogen. Combustion and Flame, vol. 1, no. 2, s. 155–161. (Tiivistelmä) ISSN 0010-2180.
- Ullmann 1988. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Fifth, completely revised edition. Volume A11. Gerhardt, W. (executive editor). Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH. S. 396–400. ISBN 0-89573-161-4.
- Werley, B. 1988. An oxygen index update. Teoksessa: Schroll, D. W. (toim.). Flammability and sensitivity of materials in oxygen-enriched atmospheres, vol. 3. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials. S. 248–261. (ASTM Special Technical Publication 986). ISSN 0066-0558.

LIITE 5

Venttiilin ja putkiston tutkimukset



Tornion terästehtaan sulaton happiputkiston pääsulkuventtiilin räjähdysenomainen palaminen 19.9.2003

Venttiilin ja putkiston tutkimukset

Tilaaaja: Onnettomuustutkintakeskus, Helsinki

Julkinen	-	Rekisteröidään VTT:n tutkimusrekisteriin JURE:een	-
Luottamuksellinen onnettomuustutkintalautakunnan raportin (OTK B5/2003Y) julkaisuun saakka			X
Sisäiseen käyttöön			-

Raportin nimi Tornion happiputkiston pääsulkuventtiilin räjähdysenomainen palaminen 19.9.2003. Venttiilin ja putkiston tutkimukset	
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro Onnettomuustutkintakeskus	Raportin numero TUO74-045043
Projektin nimi OTK/TORNIO	Suoritteen numero G3SU01289
Laatija(t) Klaus Rahka	Sivujen/ liitesivujen lukumäärä 24 s.
Avainsanat Happi, putkisto, sulkuventtiili, perhosventtiili	
Tiivistelmä Tornion terästehtaalla happilinjan sulkuventtiiliä avattaessa venttiili syttyi palamaan seurauksena paineellisen putkiston katkeaminen, kolme kuolonuhria ja mittavat vaikkakin rajalliset vahingot osassa terästehtaan sulattoa. Palanut venttiili ja siihen liittyvää putkistoa saatiin VTT:lle lähempää tarkastelua varten. Tehdas toimitti myös muita samanlaisia venttiileitä ja putkiston osia tutkimuksia varten. Rinnan tämän tutkimuksen kanssa suoritettujen laajan kirjallisuuskatsauksen (Risto Lautkaski) ja teknillisen termodynamiikkakatsauksen (Lauri Eerikäinen) valossa tarkasteltiin tässä tutkimuksessa onnettomuuden kohdanneen putkiston teknisiä yksityiskohtia ja venttiilien käyttäytymistä sen selvittämiseksi olisiko jotain venttiilin rakenteeseen liittyvää tunnistettavissa mahdolliseksi venttiilin syttymissyiksi. Teknisten tutkimusten katettua esimerkiksi vaihteen voiteluaineen pääsymahdollisuuden hapen kanssa yhteyteen, läppä-tiivisteiden käyttäytymistä hapen virratessa raollaan olevan läpän raosta sekä erityisesti läpän laakereiden toimintakykyä, päädyttiin havaintoon mahdollisuudesta laakerivaurioon käytettäessä tätä venttiilivalmistetta happilinjassa. Happilinjan epäpuhtauksilla saattaa olla oma merkittävä osuutensa laakerivaurion mahdollisuuteen, sillä tässä venttiilivalmistuksessa läpän liukulaakerit ovat suojaamattomia ohivirtaavaan happeen päin. Liukulaakerit ovat myös mitoitukseltaan sangen pienikokoisia kantamaan sulkupaineen 40 bar synnyttämää noin 280 kN voimaa, jolloin läpän liikuttelu paineenalaisena näyttäisi muodostavan riskin laakeripinnoitteen eheänä kestämiselle.	
Espoo, 16.12.2004	
Rauno Rintamaa Tutkimuspäällikkö	Klaus Rahka Johtava tutkija
Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT): Onnettomuustutkintakeskus, 1 kpl VTT Tuotteet ja tuotanto, 1 kpl	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

VTT TUOTTEET JA TUOTANTO

Kemistintie 3, Espoo
PL 1704, 02044 VTT

Puh. (09) 4561
Faksi (09) 456 7002,
(09) 456 5875

etunimi.sukunimi@vtt.fi
www.vtt.fi/tuo
Y-tunnus 0244679-4

Alkusanat

Tornion terästehtaan sulatolla sattui 19.9.2003 happilinjän tulipalo, jossa linjan sulkuventtiili ja osa putkistoa paloi. Palo levisi ympäröiviin läheisiin rakenteisiin. Kokonaisvahingot olivat mittavia, mutta laajoilta tuhoilta vältyttiin. Tämän tutkimuksen kohteena on ollut palanut venttiili sekä siihen liitetyt läheiset putkiston osat. Palaneen kanssa samankaltaisten venttiilien tutkimukset esitetään myös.

Tutkimustyö on suoritettu paloa tutkimaan asetetun lautakunnan tilauksena. Teknisen tutkimuksen keskeisinä kimmokkeina ovat toimineet erikoistutkija Risto Lautkasken suorittama laaja kirjallisuuskatsaus sekä erikoistutkija Lauri Eerikäisen suorittama teknillistermodynamiin tarkastelu syttymiseen ja palamiseen liittyvistä seikoista. Havaitun laakerivaurion merkityksen tarkastelu nojaa merkittävässä määrin erikoistutkija Peter Anderssonin ja tutkimusprofessori Kenneth Holmbergin havaintoihin ja kokemuksiin. Tutkimuksissa avusti ansiokkaasti vastaava tutkimusavustaja Arto Nyholm.

Tutkimusten rahoitus on myönnetty Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintamäärärahoista tarjouksen perusteella.

Tekijä kiittää kaikkia tutkimukseen myötävaikuttaneita osapuolia ja erityisesti Tornion terästehtaan henkilökuntaa, joka avuliaasti edisti sitä.

Espoo, joulukuu 2004

Tekijä

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
1 Johdanto	4
2 Tavoite	4
3 Kohteen kuvaus	4
4 Rajaukset	5
5 Menetelmät	5
6 Tulokset	5
6.1 Havainnot palaneesta venttiilistä	5
6.1.1 Linjan rekonstruktio	5
6.1.2 Palanut venttiili	5
6.1.3 Palaneen venttiilin palovauriot	8
6.1.4 Vaihte	13
6.1.5 Venttiilin läppääkseli ja läpän kääntökulman rajoitin	15
6.1.6 Venttiilin asennuksen tiiveys	16
6.2 Muiden venttiileiden tutkimukset	17
6.2.1 FS-tiivisteiden vaurio	17
6.2.2 Kuormituskokeet	17
6.2.3 Laakeritutkimus	19
6.2.4 Rakopuhalluskoe Torniossa toukokuussa 2004	20
6.3 Huomioita EIGA:n ja venttiilin valmistajan ohjeistuksesta	22
7 Tulosten tarkastelu	22
8 Johtopäätökset	23
9 Yhteenveto	24
10 Lähdeviitteet	24

1 Johdanto

Tornion terästehtaalla 19 syyskuuta 2003 sattuneen happilinjän sulkuventtiilin räjähdyskato-omaisen palo-onnettomuuden selvittämiseksi on tutkittu palanutta venttiiliä ja siihen liittyvää putkistoa mahdollisen teknisen syttymissyyn tunnistamiseksi.

Palaneen venttiilin lisäksi on tutkittu samaa tyyppiä ja valmistetta olevia venttiileitä, joita saatiin kahdessa erässä terästehtaan poistettua ne käytöstä.

2 Tavoite

Palaneen ja sen kanssa samanlaisten venttiilien tutkimusten tavoitteena on ollut löytää - mikäli mahdollista - tekninen aihe syttymisen mekanismiksi ja sulkea pois muita kirjallisuustutkimuk- sen mukaan tarkasteltavissa olevia syitä. Tutkimuksissa on keskitytty etsimään sellaisia tekni- siä seikkoja jotka olisivat voineet toimia itsestään sytyttävinä laajan kirjallisuuskatsauksen valossa (R. Lautkaski).

3 Kohteen kuvaus

Palanut pääsulkuventtiili oli sulattohalliin johdetun puhtaan hapen linjan pystysuoran put- kisto-osan alkupäässä heti putkikäyrän jälkeen. Rakennuksen seinän läpi johdettu vaakasuora putki noin seitsemän sataa metriä sulatolta sijaitsevalta happiasemalta jatkui käyrän ja venttii- lin jälkeen pystysuoraan alas edelleen mutkien ja käyttöventtiilien kautta happipuhallus- lansirille. Palaneen pääsulkuventtiilin kohdalla ja muilta valtaosiltaan happilinja oli halkaisijaltaan 300 mm. Nykytarpeeseen suuri halkaisija sisältää varautumisen kaksinkertaiseen hapen kulutukseen joskus tulevaisuudessa. Palanut venttiili heti turman jälkeen kuvattuna on kuvassa 1.



Kuva Jari Hämäläinen, Onnettomuustutkintakeskus

Kuva 1. Sulkuventtiili ja sen läheinen paloalue heti tulipalon jälkeen. Vasemmassa kuvassa keskellä ylösponnahtanut hapen tulolinja palaneine sulkuventtiileineen, alaoikealla on pystysuoraan jatkuvan linjan jatke. Oikeassa kuvassa ylösponnahtanut palanut venttiili.

Venttiilipalon yhteydessä putkiliitos katkesi venttiilin alapuolelta niin että venttiili ja sen yläpuolinen putkilinjan osa ponnahti muutaman metrin verran kiertyen ylöspäin (kuva 1 a ja b) venttiiliä edeltävään putken mutkaan kohdistuneiden virtauksen suunnanmuutokseen ja paineeseen liittyvien voimien vaikutuksesta .

4 Rajaukset

Palaneen venttiilin tutkinnassa on rajauduttu näytteitä mahdollisimman vähän rikkovin menetelmin suoritettaviin havaintoihin ja kokeisiin palaneen kanssa samantyyppisillä venttiileillä palotapauksen vaikeaselkoisuuden vuoksi jottei tutkimusten edetessä myöhemmin tarvittavat tarkastelut vaarantuisi. Tutkimusten johtopäätökset ovat ilmeisiä (apparent, evident) eivätkä tieteellisesti todistettuja (konklusiivisia, conclusive).

5 Menetelmät

Tutkimukset on pääasiassa suoritettu silmämääräisin havainnoin ja testaamalla soveltuvien osin esimerkiksi rajautuen avaamaan pelkästään ruuviliitoksia, osittain on käytetty rikkomattomaa röntgenkuvausta palaneen rungon sisäisten piirteiden havaitsemiseksi.

Myös on suoritettu toiminnallisia kokeita muilla vahingoittumattomilla palaneen kanssa samanlaisilla venttiileillä kuormituspenkissä sekä terästehtaalle rakennettua painekoelinjaa käyttäen. Lopuksi yksi ulkoisesti vahingoittumaton venttiili purettiin sahaamalla laakereiden tutkimiseksi, kun muuta menettelyä ei ollut yrityksistä huolimatta selvittää toiminnallisissa kokeissa ilmenneitä vaikeaselkoisia epä johdonmukaisuuksia.

6 Tulokset

6.1 Havainnot palaneesta venttiilistä

6.1.1 Linjan rekonstruktio

VTT:llä palossa vaurioitunut putkistoalue koottiin suunnilleen alkuperäiseen muotoonsa, kuva 2. Vasemmassa kuvassa on vaakasuorasta happilinjasta alas johdettu paineentasauslinjan venttiili, joka on suljettu. Paineentasauslinja on palossa katkennut heti sulkuventtiilin alapuolelta ja sen jatko-osa kadonnut. Liitosalueella noin metrin venttiilistä alaspäin on repeämä, joka ilmeisesti on syntynyt katkenneen ohituslinjan putken roikkuessa kuumen ja lujutensa menettäneen putken seinämässä. VTT:llä säilytyksen jälkeen venttiilin läpän kääntämiseen tarvittu vaihde on alkanut tihkua voitelurasvan kevyitä jakeita.

6.1.2 Palanut venttiili

Palanut venttiili on vakiintuneen termistön mukaan perhosventtiili (papillon, butterfly), jonka sulkuosa on yksiosainen kääntyvä putkilinjan keskeltä nivelöity läppä. Venttiili ja sen tyyppikilpi on kuvassa 3. Varsinaisen tyyppikilven lisäksi venttiilissä on "FIRE SAFE"-lisätiivistettä osoittava FS-kilpi sekä virtaussuuntaa osoittava kilpi.



Kuva 2. VTT:lle toimitetun palaneen venttiilin (sarjanumero: 77113 1001 0110.085685.02) ja putkiston osat koottuna. Oikeassa kuvassa läpän asennon muovinen osoitin vielä paikallaan, vasemmassa kuvassa poistettu. Vaihteen käsipyörä puuttuu.

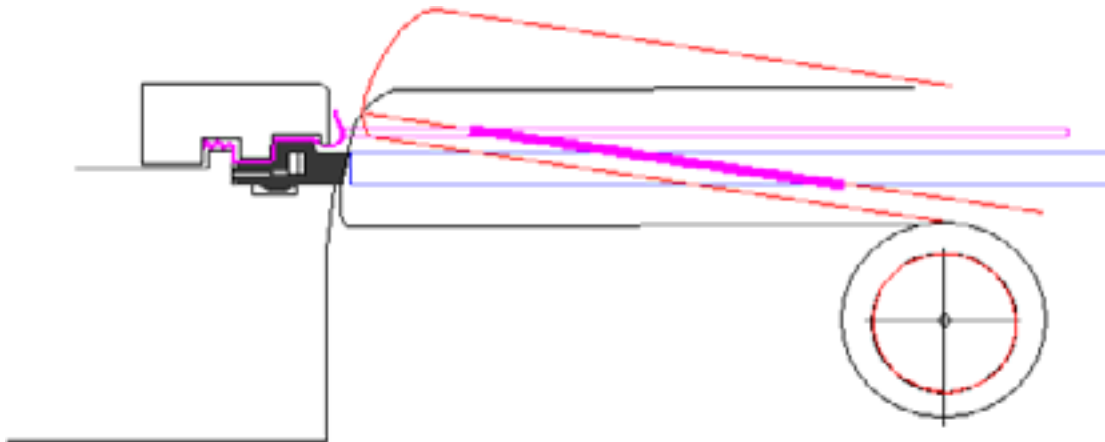


Kuva 3. Palaneen kanssa samanlainen perhosventtiili 1001 0110 085685.01. Tämä on ilmeisesti sarjassa palanutta edeltävä. Irrotettu palolinjasta palopaikan alavirralla noin 15 metrin etäisyydeltä palaneesta. Tyypikilpi toisesta samanlaisesta venttiilistä oikealla.

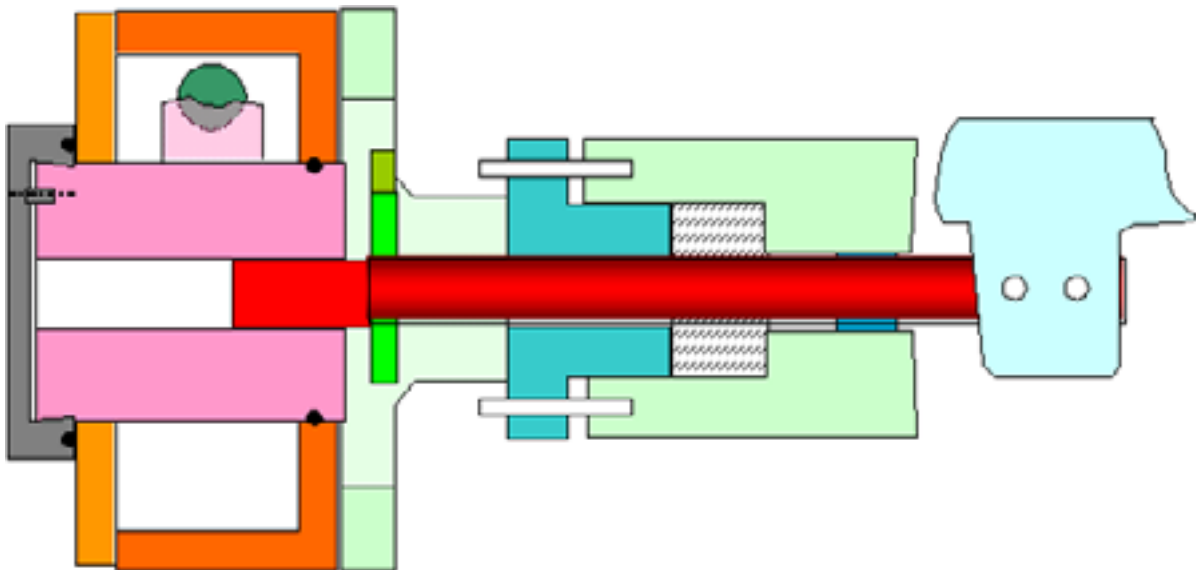
Venttiili on valmistajansa piirustuksen 77113 mukainen. Se on spesifikaation mukaan kauttaaltaan ruostumattomasta AISI 316 ("haponkestävä" 18Cr 10Ni 3 Mo) teräksestä valmistettu, läpän akseli lujaa ferriittistä 17-4Ph ("erkautuskarkaistu" 17Cr 4Ni 2Cu). Painetiiviste PTFE (teflon) jolla ruostumattomasta 0,3 mm paksusta pellistä valmistettu varmistusosa venttiilin kuumenemisen varalta ja läppälaakeriholkit terästä ja pinnoitettu teflonilla. Läpän tiivistepinta on päällystetty kromilla.

Läppä on yksiosainen kääntyvä "pallon" viipale, jonka tiivistyspinta on muodoltaan pallopinta. Viipale on hieman "pallon" isoympyrältä sivusta, läpän akselin sijoittuessa isoympyrätasoon ja noin 25 mm sivuun läpän tiivistyspinnasta. Läppää on kierrettävä noin 5 astetta ennen kuin sen reunaan alkaa syntyä aukkoa. Näiden 5 asteen puitteissa läpän tiivisteiden vastus venttiilin avaamiselle on tuntuva venttiiliä käytävällä käsipyörällä myös ilman paineen kuor-

mitusta. Akselin halkaisija on 35 mm. Tiivisteiden toiminta perustuu tiivisterenkaiden kiristymiseen läpän ympärille kun läppä sulkeutuessaan kiertyy tiivisteiden sisään. Tiiviste on itsekiristyvä, eikä läppää saa tiiviimmäksi kiertämällä tiukempaan.



Kuva 4a. Kaaviollinen esitys venttiilin toimivista osista. Runko tiivisteineen vasemmalla, läppä akseliseinän oikealla asennoissa kiinni (mustalla) ja raollaan vastaten onnettomuutta (oranssi). Kaasu tulee ylhäältä. Vaihte katsojasta pois päin.



Kuva 4b. Kaavio venttiilin läppää kiertävästä mekanismista. Läppä vaaleansinisellä oikealla. Viistoraidoitettu alue on ensiöakselin poksitiiviste. Laakeriholkki, joista kuvassa on toinen, kirkkaan sinisellä. Läpän liikerajoinen kirkkaan vihreällä, venttiilirunko vihreällä, vaihteen pesä oranssilla. Kierukka-vaihteen käyttävä kierukka-akseli tummalla vihreällä.

Venttiilin läpän kääntämistä varten siinä on vaihte jossa puolestaan käsipyörä. Kierukka-vaihteen välityssuhde on 40. Tällöin 90 asteen (1/4 osa koko kierroksesta) läpän liike "kiinni-auki" vaati 10 käsipyörän kierrosta. Vaihte oli asennettu venttiilille niin että auki asentoa ilmoittavat tekstit "open" olivat ylösalaisin ja voideltava kierukkaosa näin ollen läppäakseliin liitetyn karahammaspyörän yläpuolella. Teknisesti tämä asento ei ole voitelun tai läpän asennon ilmaisimen lukemisen kannalta oikea tai puhtasoppinen, vaikkakaan sillä ei ollut välitöntä osuutta turmaan. Vaihteen voitelu oli nähtävästi väärästä asennosta huolimatta toiminut, sillä avattaessa rasvaa oli myös yläpuolisella kierukka-akselilla, eikä irrotetun vaihteen vastus tuntunut normaalia suuremmalta.

Taulukko 1. Luettelo Tornion terästehtaan SAPAG-300mm käytöstä poistetuista venttiileistä. Onnettomuusventtiili rivillä 2. Kuvan 3 venttiili rivillä 1.

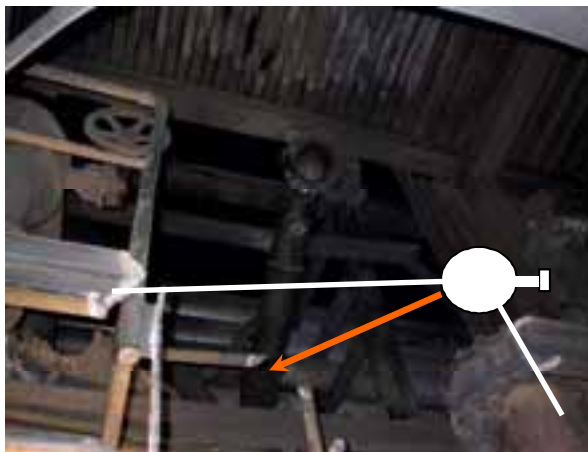
77113	1001	0110	085685	01	VTT:lle heti turman jälkeen
same	1001	0110	085685	02	VTT:lle heti turman jälkeen
same	501	015	072666	02	VTT:lle heti turman jälkeen
77113	101	011	065452	01	poistettu happilinjasta 2003, koelinjan päässä 2004
77113	501	015	072660	01	poistettu happilinjasta 2003, VTT:lle 20040910
77113	1001	0110	085665	03	poistettu happilinjasta 2004, koelinjaan elok 2004
77113	501	015	085685	01	poistettu happilinjasta 2004, VTT:lle 20040907

6.1.3 Palaneen venttiilin palovauriot

Palaneesta venttiilistä on pääteltävissä että palon tapahtuessa läppä oli kallellaan kaikkiaan noin 9 asteen kulmassa (4 astetta avautumisen alusta), jolloin aukon leveys suurimmillaan oli noin 3 mm putkilinjan poikittaisessa suunnassa ja kuunsirpin muotoisten aukkojen ollessa noin 200 mm leveät, ks. kuva 4. Asennon päättely nojaa kahteen havaintoon: läpän akselin asentoon sekä läpän palojälkiin.

Selkeiden palovaurioiden lisäksi palaneesta venttiilistä puuttui käsipyörä, joka todistajien mukaan oli irronnut venttiiliä avattaessa juuri ennen onnettomuutta. Tästä on päätelty että venttiili olisi jostain syystä jumittanut ja avausvastus olisi ollut käsipyörän sokalle liikaa. Tähän ilmeiseen toimintahäiriöön palataan tuonnempana.

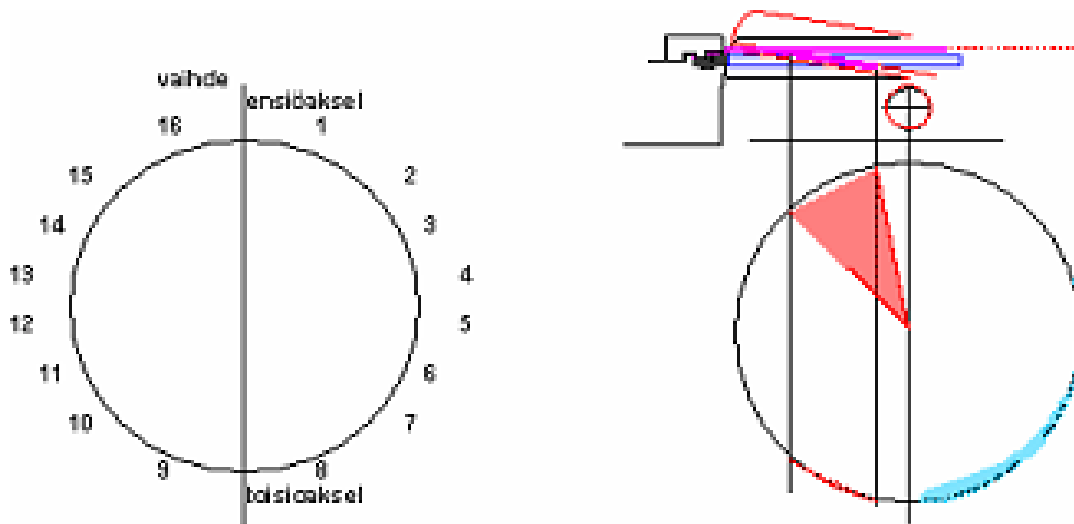
Venttiilin palovaurioita tarkastellessa voidaan kuvasta 1 havaita että paloalue on suuntautunut linjasta sektoriin joka on pystysuorasta putkesta hieman sivuun ja vaihteesta poispäin (ks. mm poisalanut kulkusillan tukikaiteen/? osa oranssin nuolen kärjen kohdalla). Ks. kuva 5.



Kuva 5. Palovaurion pääsuunta. Kuvan 7 kuvaussuunta oranssilla nuolella.

Venttiili oli kiinnitetty molemminpuolisilla ruuveilla putkistoon venttiilirungon toimiessa liitosvoimien välittäjänä. Ruuvipareja oli 16. Ruuveja oli jouduttu käyttämään sen takia että venttiilin kiinnitysreikien jako oli poikennut putkilaippojen reikäjaosta hieman, jolloin kierteiden osittaisella poistamisella ruuvit oli saatu sopimaan. Varsinaisia vaarnaruuveja ei siten ollut voitu käyttää. Elokuussa koelinjassa testattu venttiili oli tältä osin putkiston laippojen kanssa yhteensopiva, jolloin ruuvit sopivat ilman muutoksia. Muutoksilla ei ilmeisesti kuitenkaan ollut vaikutuksia linjan toimivuuteen, lähinnä tiiveyteen.

Seuraavassa venttiilin sektoreita nimitetään ruuvipareittain läppää käyttävästä ensiöakselista virtaussuuntaan katsoen myötäpäivään (kuvan 6 ympyrä eli läppä katsottuna virtaussuuntaan, vaihde ylhäällä). Valokuva läpistä kuvassa 7, vasen ylhäältä virtaussuuntaan, oikea alhaalta vastavirtaan, akseli pystysuunnassa, kuten kuvan 6 kaaviossa.



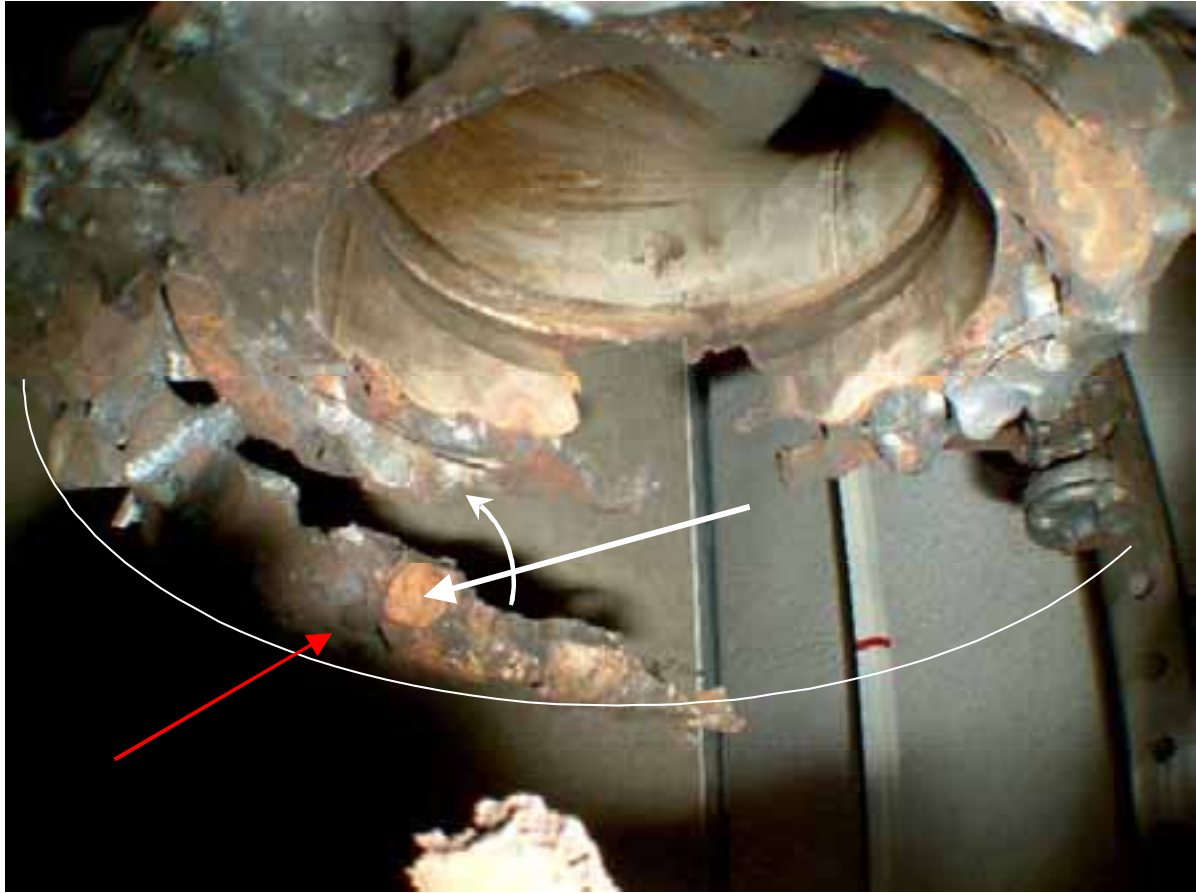
Kuva 6. Venttiilin sektorijako valitun ruuvien numeroinnin mukaan. Venttiilin runko täysin palanut sektorista 10-11. Punaisella merkityt venttiilin läpän palovauriot virtausta päin avautuvassa läpän puoliskossa, sinisellä virtauksen suuntaan liikkuvassa läpän puoliskossa.



Kuva 7. Palaneen venttiilin läppä päältä (vasemmalla) ja alaspäin (oikealla). Akselit pystysuunnassa. Kuvassa vasemmalla "päältä" läpän oikeanpuoleinen, myötävirtaan siirtynyt tiivistyspinta palanut, vasemmanpuoleinen vastavirtaan noussut tiivistyspinta palanut vain niissä sektoreissa, jotka ovat olleet tiivistettä vasten. Suurimpien palovaurioiden kohdalla, eli sektoreissa 15-16 ja 9-10 on vaikuttanut voimakas rakovirtaus, samalla kun raon toisella reunalla on ollut PTFE tiiviste. Läpän tiivistyspinta on miltei vaurioitumaton sektorissa 11-14, joka on sijainnut tiivisteestä hapen tulosuuntaan. Tiivisteestä hapen menosuuntaan oleva tiivistyspinta, joka on ollut suurelta osin palaneen PTFE tiivisteiden palon vaikutusalueella on tyystin palanut sektorissa 2-8, suurimman palovaurion sijaitessa toisioakselin (eli "vapaan") tuntumassa, vasemman kuvan oikea "alanurkka".

Venttiilirunko oli molemmilta linjatiivistyspinnoiltaan suurelta osin palanut, ja venttiilirunko oli hävinnyt sektorista 9-12. Linjatiivistettä ja hieman enemmän putkea oli jäljellä venttiilin alapuolella sektorissa 15-4 eli vaihteen puolella, joten putken suurin palovaurio on sektorissa

5-14, mikä on vapaan akselin puolella. Kuvassa 7 venttiili on esitetty eniten palaneeseen suuntaan 9-10 kuvattuna. Kuvassa myös toisioakseli keskeltä hieman vasempaan.



Kuva 8. Venttiilin palovaurio valokuvattuna suurimman paloalueen suuntaan "10" (kuvan 5 oranssi nuoli). Valkoinen nuoli osoittaa läpän toisioakselia. Läpän kiertosuunta valkoisella käyrällä nuolella, punainen nuoli osoittaa läpän toisioakselin laakerin palovauriota. Valkoinen kaari noudattaa venttiilirungon alapintaa. Katkenneen ohituslinjan venttiili oikealla.

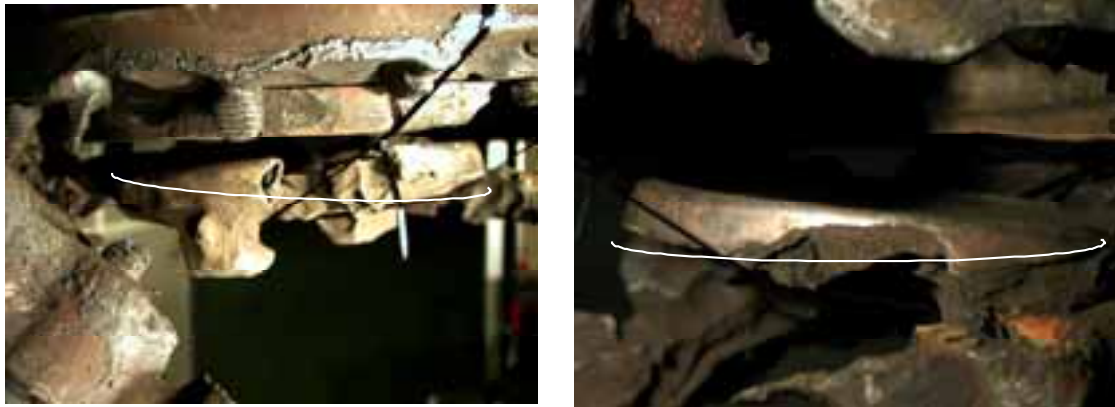


Kuva 9. Läpän toisioakseli, jonka laakeriholkista on eniten palanut se sektori, jolle akseli vierii avaamisen alkuvaiheessa ennen kuin liukumisen alkaa. Mittanuolen kohdalla akselin palaneen reunan lyhin etäisyys rungon aksiaalilaakerointipintaan on 90 mm, mikä merkitsee sitä, että 25 mm leveä laakeriholkki on viivan jatkeelta palanut. Akselin kohtisuoraa poikkipintaa kuvaavat ellipsit on sijoitettu kuvaamaan osittain palanutta laakeriholkkia.



Kuva 10. Vaihteen puoleisen läppäakselin (ensiöakseli) alue palaneessa venttiilissä. Ylemmässä kuvassa akselin pää indikoitu punaisella ja venttiilirungon ja putkilaipan liitos valkealla viirulla. Laakeriholkin yläpuoli palanut täysin, alapuolelta jäljellä noin 5 mm. Rungon sisäpinnalta palanut noin 25 mm kerros, käsittäen laakeriholkin alueesta 20 mm ja holkin upotusosan noin 5 mm.

Palovaurion jakaumaa voidaan myös arvioida tarkastelemalla palaneen venttiilin läppää, josta kaavio kuvassa 6 ja valokuvat kuvissa 7 ja 11.



Kuva 11. Läppä kuvattuna suunnista 15 (ensiöakseli) ja 10 (toisioakseli). Tiivisteiden sijainti indikoitu valkoisella käyräviivalla. Palovaurio vain tiivisteestä alaspäin lukuunottamatta suuntia 15 ja 10, joissa voimakas rako-olosuhde hapen tulosuunnassa.

Läpän tiivistyspinnassa ensiöakselin vieressä havaittiin kiinnipalanutta ainesta viivamaisesti sijoittuneena, kuva 12. Vieras aine päätettiin selvittää. Kiinnipalanutta ainesta oli kaksi sarjaa, kummassakin yksittäisten kokkareiden keskinäinen etäisyys oli jäljempänä (luku 6.2.1) selostetun, toisessa venttiilissä havaitun FS-tiivisteiden poimujen jakso. On ilmeistä että jäljet ovat syntyneet vasta tulipalon aikana, sillä vahingoittumatonta venttiiliä testattaessa (luku 6.2.4) ei saatu mitään näyttöä siitä että FS-tiiviste voisi kuumentua seurauksena lommahdus poimuille. Tästä olisi seurauksena kosketus läpän kanssa normaalissa tai ehkä poikkeuksellisessa – läpän kierto paine-eron alaisena – käyttötilanteessa. Näytöt ovat siis sen suuntaiset että jäljet läpän pinnassa ovat tulipalon seurauksia.



Kuva 12. Läpän reuna käyttävän vaihteen eli ensiöakselin puolella. Reunassa kiinnipalanutta ainesta ja tumma viiru. Kiinnipalaneita kokkareita kahdessa sarjassa, kummassakin kokkareiden etäisyys vastaa FS-tiivisteiden poimujen jaksoa (luku 6.2.1).

Kemiallinen analyysi osoittaa kirkkaan läpän reunan pinnan olevan puhdasta kromia, tummentuneessa viirussa koostumus ei poikkea merkittävästi ja kiinnipalaneissa kokkareissa ainesosuudet suuruusjärjestyksessä hapen jälkeen rauta, kromi ja nikkeli. Niiden ainesosuuksien suhteet viittaavat kromista poikkeavaan aineeseen. Suuri rautapitoisuus ja suhteet ainesosien välillä näyttää osoitukselta siitä, että FS-tiivisteestä (AISI 316 -teräspeltiä, 70%Fe, 18%Cr, 10%Ni, loput Mo ym.) olisi tarttunut materiaalia läpän pintaan esimerkiksi hankauksen seurauksena.

6.1.3.1 Yhteenveto palovauriohavainnoista

Merkittävin palovauriohavainto näyttäisi liittyvän läpän toisioakselin alueeseen laakereineen, joka on palanut kahdesta akselista enemmän ja niin, että se sektori laakeriholkista, jolle akseli avaamisen yhteydessä vierii ennen liukumista (P. Andersson) on palanut eniten ja täysin pois. Vaihteen puolella oleva ensiöakselin laakeriholkki on palanut vain virtauskuilun päästä sekä (virtauksen suunnasta) päältä ja laakeriholkkia on jäljellä alapuolelta (joka kuormittuu paine-eron kuormasta). Palo jälki korreloi jäljempänä selostetun sahaamalla avatun venttiilin laakereiden eheyden kanssa siten, että sahatussa venttiilissä toisioakselin kuilun puoleinen ensiölaakeri oli vaurioitunut ja ensiöakselin kuilun puoleinen ensiölaakeri ehjä. Venttiilirungon palovaurioiden jakauma näyttäisi noudattavan sitä, että kytopesän muodostuminen ja syttyminen olisi voinut tapahtua läpän toisioakselilaakerissa siellä missä akseli aluksi vierii ja - jos liukukitka vaurion seurauksena on suuri - lopulta yht'äkkiä alkaa luistaa. Suuri pintapaine voi liu'un alkaessa synnyttää runsaan kuumenemisen.

6.1.4 Vaihte

6.1.4.1 Käsipyörän murtunut sokka

Jo ennen palaneen venttiilin saapumista VTT:lle oli kiinnitetty huomio siihen, ettei vaihteella ollut käsipyörää ja että käsipyörän lukinnut sokka oli murtunut, kuva 13.



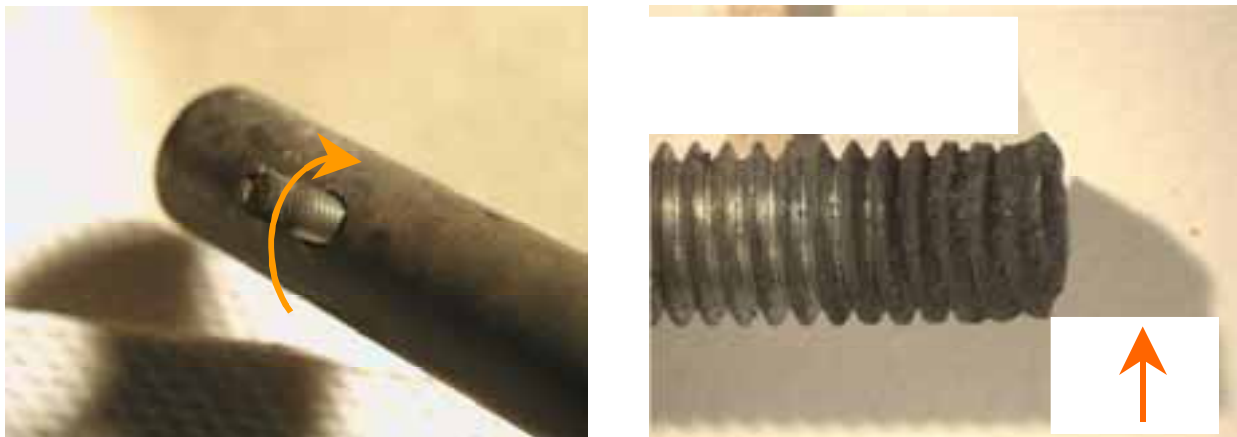
Kuva 13. Palaneen venttiilin vaihte palopaikalla kuvattuna. Käsipyörän sokka on katkennut ja hieman esillä.

Käsipyörän akseli oli taipunut ilmeisesti sen osittaisesta palamisesta seuranneen vetelyn takia. Sokan murtumisesta ja siitä, että avaamiseen ryhtyneet venttiilin käyttäjät olivat pyytäneet putkipihtejä ja saaneet ne, oli päätelty että venttiili oli jostain syystä ollut jumissa. Putkipihtien käytöstä käsipyöräakselin kiertämiseen oli viitteitä n. 4 - 5 putkipihtiötteen mukaisten hampaan painauman muodossa. Jumittamismahdollisuutta ryhdyttiin etsimään systemaattisesti ensin vaihteesta ja sen voitelusta, ja sitten muista lähteistä, lähinnä venttiilin rakenteesta itsestään. Vieraiden ainesten vaikutusta ei voitu sulkea pois, sillä putkilinjasta ennen venttiiliä oli löytynyt jonkin verran erilaista likaa (Raportti tunnistuksesta VTT TUO75-043817 sekä TUO25-044641).

Myös venttiilin sisäinen kitka ja paine-eron aiheuttama kuormitus voisivat synnyttää tuntuva vastusta jos venttiiliä yritettäisiin avata paine-eron alaisena. Erityistä mielenkiintoa tunnettiin läppäakselin ja laakeriholkkien kosketuskohtaan, jossa akseleiden mitoitus päätellen olisi suurella pinta-alalla suuri pintapaine. Sen selvittämiseksi miten paine-eron aiheuttama kuor-

mitus vaikuttaisi suoritettiin läpän kiertokokeita kuormituksen alaisena. Kokeilla tavoiteltiin selvyyttä läpän akselin laakeroinnin toimivuuteen, sillä se on ainoa putkipainetta kannattava kohta venttiilissä sen ollessa suljettuna. Kitkan mahdollista syntymissyitä selvitettiin vahingoittumattomia venttiileitä tutkimalla (luku 6.2).

Vaihteen käyttöakselilla ollut sokanpalanen oli näytteiden saapuessa VTT:lle painunut akselin reikään. Se irtosi muovipalaa käyttäen kevyellä painalluksella. Sokan tynkä vahvistui M6 ruuvien pätkäksi, joten alkuperäinen putkisokka (kuten kahdessa vahingoittumattomassa samanlaisessa) oli jossain varhaisemmassa vaiheessa mahdollisesti katkennut (suurehkon leikkauslujuuden takia epätodennäköistä) tai kadonnut ja korvattu ruuvilla. Ruuvintyngän tyssäytyneistä kierteistä ja pään taipumasta pääteltiin, että ruuvisokka olisi katkennut venttiiliä avattaessa, kuva 12. Myös sulkusuunnassa oli kierteiden harjojen tyssäymiä, mutta ne olivat pienempiä. Venttiiliä oli ehkä ollut tapana sulkiessa tiukata, vaikkei tiukentamisella tällä venttiilityypillä voikaan saavuttaa tiivemmyyttä.



Kuva 14. Vaihteen käyttöpyörän katkennut "sokka". Jousi(putki)sokan asemesta oli käytetty pehmeämpää ruuvia.

Vakiosokan (putkisokan) leikkauslujuus on standardin mukaan noin 2,5-kertainen ruuvien leikkauslujuuteen (tyvi 4 mm, leikkauslujuus n. 450 MPa) verrattuna, joten vakiosokan murtuminen on epätodennäköistä tai vaatii merkittävästi suuremman haitan läpälle. Siksi on myös mahdollista, että palaneen käsipyörän asennus on alun alkaen tehty ruuvilla putkisokan asemesta.

6.1.4.2 Putkipihtien jäljet

Vaihteen käyttävältä, eli käsipyörän akselilta, löytyi 4 - 5 putkipihtiotteen tartuntapainaukset.

6.1.4.3 Vaihteen toimintakunto

Vaihteen toimintakunto testattiin tutkimalla sen sisäinen voitelu sekä irrotuksen jälkeen pyörittämällä.

Venttiilin vaihteen kansi avattiin voitelutilanteen selvittämiseksi ja mm. rasvanäytteen ottamista varten (rasva tutkittu eri toimeksiantona VTT Prosessitekniikassa). Vaihdepesässä oli voitelun kannalta riittävä määrä rasvaa, joten voitelun puutetta ei havaittu.



Kuva 15. Venttiilin käyttövaihte kansi avattuna. Voitelu näyttää toimineen.

Venttiilin saapuessa VTT:lle sen käyttövaihte oli päältä kuiva, vaikka valokuvattaessa heti turman jälkeen kannessa oli ollut kosteutta (kuten viereisen raakahappilinan venttiilin vaihteen kannessakin) – ilmeisesti voiteluainetta oli tihkunut kannen ja laakeroidun päähammaspyörän välisen 0-rengastiivisteiden raosta. Samoin viereisen raakahappilinan vaihte oli päältä märkä osoittaen vaihteen tihkuvan voitelurasvaa "luonnostaan". Noin viikon VTT:llä varastoinnin jälkeen vaihteen kansi oli alkanut kastua kansitiivisteestä tihkuneesta voitelurasvan kevyestä jakeesta. Vaihteen avaamisen ja poistamisen yhteydessä tarkasteltiin läppäakselin kytkimenä toimivaa vaihteen neliökarapesää ja sen sekä läppäakselin kastumista, mutta karapesä ja akseli todettiin täysin kuiviksi. Tämä näyttäisi osoittavan ettei vaihteen voitelurasvalla ole mahdollisuutta päästä venttiiliin vaihteen itsensä vuotamisesta huolimatta. Voitelulla ei siten näytä olevan yhteyttä venttiilin palamiseen. Myöskään mitään kytöpesäkettä ei voitu todeta tältä alueelta.

Vaihteen irrottamisen jälkeen se koottiin erillisenä toimintakyvyn kokeilua varten. Siinä ei havaittu mitään erityistä liikevastusta.

6.1.5 Venttiilin läppäakseli ja läpän kääntökulman rajoitin

Palon jälkeen suoritettujen vaihteen irrotuksen yhteydessä havaittiin, että venttiilin oma läpän akselille asennettu liikerajoitin oli siirtynyt paikaltaan vaihdelaipan sisältä ja karan poksi-tiivistelaipan tuntumassa ja kara-akselin vaihteeseen sisään ulottuva osuus oli noin 10 mm pitkä 25 mm:n sijasta. Läppä oli siis irrotessaan vetänyt ensiöakselia vaihteesta putken suuntaan, jolloin liikerajoitinkin oli siirtynyt mukana. Akselin kääntökulman rajoitin oli palon jälkeen myös selvästi väärässä asennossa, kuva 16.

Läppäakselille asennetun liikerajoittimen oikea asento olisi yläsektori ± 60 astetta pystysuorasta, eli palon aikaisen läpän asennon mukaan noin 38 astetta pystysuunnasta oikealle, kun se nyt on 30 astetta alas-suunnasta oikealle. Läpän liikerajoittimen lukitusruuvi puuttui.

Liikerajoitin oli normaalisti vaihdetta kannattavan laipan puitteissa. Laipan aukko oli siten muotoiltu, että läpän ääriasennot auki-kiinni määräytyivät osaltaan aukon muodon ja toisaalta liikerajoittimen asetuksen mukaan. On ilmeistä että akseli oli ennen katkeamistaan läpän vierestä läpän irrotessa siirtynyt putkeen päin ja liikerajoitin sen mukana. Seikalla ei kuitenkaan näyttäisi olevan yhteyttä venttiilin syttymiseen, sillä alueella ei ole kytöpalopesäkettä osoittavia vaurioita. Toisaalta myös vaihte oli liikerajoittimin varustettu. Liikerajoittimen tällainen väärä asento voi kuitenkin lisätä vastusta venttiilin avaamiselle.



Kuva 16. Vaihteen kiinnityslaippa venttiilirungossa. Akselilla oleva rengas alaoikealle sojottavine nokkineen on läpän liikerajoitin, jonka lukkoruuvi puuttuu tyystin. Puuttuminen ei vaikuta venttiilin läpän toiminnan ääriasentoihin sillä myös vaihteessa on rajoittimet. Mikäli akselin rajoitin juuttuu akselille tässä väärässä asennossa voi rajoitin aiheuttaa venttiilin jumittumista sitä avattaessa (kuvassa vastapäivään), sillä nokka törmää tällöin laipan sisäpuoliseen reunaan ja voisi kiilautumalla tätä vasten aiheuttaa jumittamista.

6.1.6 Venttiilin asennuksen tiiveys

Venttiili ja siihen yhdistyvät putket laippoineen oli liitetty toisiinsa ruuveilla vaarnaruuvien sijasta, sillä venttiilin reikäjako poikkesi hieman putkien irtolaippojen reikäjaosta ja sovitus onnistui ruuveja hieman kaulasta ohentaen kierteitä poistaen. Tiivisteen yläpuolella eli paineen puolella tarvittiin pidemmät ja alapuolella riitti lyhyemmät ruuvit johtuen tiivisteen kiinnitysrenkaasta, joka teki venttiilirungosta asymmetrisen. Nimellismittojen mukaan olisi käytetty 100 mm:n ja 90 mm:n ruuveja, ja venttiilirunko toimisi itse putkiston pitkittäisiä voimia kierteiden kautta välittävänä rakenne-elementtinä. Putkivoimat siirtyvät tällä järjestelyllä ruuvista toiseen rungon kautta. Sen selvittämiseksi, ettei väärän pituisilla ruuveilla olisi synnytetty kiristymätöntä laippaliitosta ja sellaisella olisi ollut vuodon takia osuutta turmaan, otettiin röntgenkuvia niistä kohdista joissa ruuvien päitä vielä oli venttiilirungossa. Tällä tavalla saatiin näkyviin tyhjä tila ruuvien välissä, mikä olisi osoitus oikeasta asennuksesta. Kuvaus osoitti että kaikissa kuvatuissa kohdissa oli ilmaväli, joten venttiilin liitokset oli mitä todennäköisimmin oikein asennettu.



Kuva 17. Venttiilin putkistoon liittävien kiinnitysruuvien röntgenkuvaus suoritettiin sen selvittämiseksi olivatko käytettyjen ruuvien pituudet oikeat. Kuvaus ei paljastanut virheitä asennuksessa.

6.2 Muiden venttiileiden tutkimukset

Rinnan palaneen venttiilin tarkastelujen kanssa suoritettiin VTT:lle heti tulipalon jälkeen toimitettujen venttiileiden 77113 1001 0110 085685 01 ja 77113 501 015 072666 02 tarkasteluja. Edellisessä havaittiin pieni vaurio FS-tiivisteessä, toinen oli ehjän näköinen. Näiden lisäksi elo-syyskuussa 2004 saatiin VTT:lle venttiilit 77113 1001 0110 085685 01 sekä 77113 1001 0110 085685 01 kokeita varten.

6.2.1 FS-tiivisteiden vaurio

Venttiilin 77113 1001 0110 085685 01 FS-tiivisteiden vaurio on kuvassa 18. FS-tiivisteiden virtauskanavassa oleva reuna on mennyt poimuille, nähtävästi kuumenemiseen liittyvän laajenemisen ja siitä seuranneen lommahduksen seurauksena. Poimujen läppää lähellä olevien huippujen väritys on kirkkaampi ja vaaleampi kuin tiivisteiden väri muuten. Tähän saattaa liittyä kosketus läpän ja FS-tiivisteiden reunan poimuhuippujen välillä. Tämä venttiili oli tulipalon aikana ollut kuumen tulisuihkun vaikutuksen alainen ja toukokuussa suoritettuna virtauskokeen jälkeen voitiin sulkea pois mahdollisuus siihen, että tulipalaa olisi edeltänyt kuumeneminen joka olisi voinut aiheutua läpän ja FS-tiivisteiden välisen kosketuksen ja esimerkiksi värähtelyihin liittyvän hankauksen takia. Toukokuussa 2004 suoritettuna virtauskokeessa todettiin vain vähäistä tiivisteiden lämpenemistä venttiilin pääasiassa jäähtyessä, eikä testatun venttiilin FS-tiivisteestä löydetty vastaavaa. Tästä pääteltiin että yhtenä työhypoteesina pidetty tiivisteiden ja läpän väliseen kuumenemiseen hankauksen takia liittyvä syttymishypoteesi voitiin sulkea mahdollisten joukosta. FS-tiivisteiden poimu ei siksi mitä todennäköisimmin liity venttiilin syttymissyihin vaan palon seurauksiin.

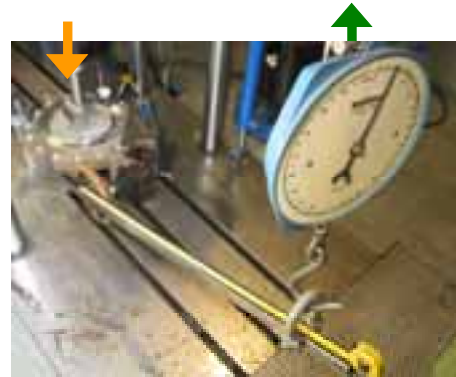


Kuva 18. Venttiilin 77113 1001 0110 085685 01 tiiviste, jonka tulipalotiivisteessä (FS- eli "fire safe") on poimuttunut alue, jossa mahdollisesti vaaleita jälkiä hankauksesta poimujen harjoilla. Poimun jakso 13 mm, joka on sama kuin palaneen venttiilin läpän reunassa olevien kiinnipalaneiden kokkareiden välimatka.

6.2.2 Kuormituskokeet

Havainto että palaneesta venttiilistä oli irronnut käsipyörä ja että sokkana käytetty ruuvi oli katkennut ilmeisenä selityksenä irtoamiselle aiheutti tarpeen selvittää millä voimalla läppä liikkuu. Oli perusteltua ajatella että palanutta venttiiliä oli avattu tasaamatta paineita sulkuventtiilin molemmilla puolilla, koska ohituslinjan venttiili oli palon jälkeen kiinni. Muun koelaitteiston puuttuessa suoritettiin VTT:llä läpän liikuttelukokeita kuormituskoneessa venttiilillä 77113 501 015 072666 02. Koejärjestely on kuvassa 19.

Jo pian palotapahtuman jälkeen oli tarkasteltu venttiilin akseleiden ja laakereiden mitoitusta ja päädytty siihen, että paineen aiheuttama poikittainen kuorma akselia kohden oli noin 130 kN:n suuruinen ja siksi hyvin suuri laakereiden toimintakuntoisuuden säilymisen kannalta, jos läppää liikuteltaisiin venttiilin ollessa paine-eron alainen. Laakerin pinta-ala, jolla saavutettaisiin esimerkiksi akselimateriaalin arvioitu myötölujuus 900 MPa olisi 1,5 cm² suuruinen ja riski PTFE-pinnoitteen rikkoutumiselle laakeriholkin reuna-alueella ilmeinen. Laakeriholkin ja PTFE-pinnoitteen myötölujuudet ovat akselia alhaisemmat, joten myötävän alueen pinta-ala on suurempi kuin tämä arvio.



Kuva 19. Kuormituskokeen järjestely kuormanalaisen läpän liikuttelumomentin mittaamiseksi.

Kuormituskokeessa oli venttiili, josta ei ulkoisesti havaittu mitään vauriota. Kun läppää kuormitettiin 35 bar:in painetta vastaavalla kuormalla 250 kN, lähti läppä kääntymään 70 - 80 Nm:n käsipyörämomentilla kun sekä läpän tiiviste että läppäakselin poksitiiviste oli irrotettu. Kun tiivisteet oli kiristetty tarvittiin 100 - 130 Nm läpän kiertämiseksi. Läpän kiertymistä mitattiin mittakellolla. Momentti oli melko vakio noin 2mm:n läpän liikkeen aikana (kiertymä $2/150 = 0,013$ rad). Läpän tiivisteseen ei tässä koejärjestelyssä vaikuttanut mikään voima. Läpän liikutteluun tarvittava momentti vastasi käsipyörän kiinnittimenä käytetyn M6 ruuvien leikkauslujuutta (tyvi 4,3 mm, leikkausmurtolujuus 450 MPa, murtovoima $450 \times 14,5 = 6535$ N akseli 20 mm, joten murtomomentti n. 130 Nm), joten käsipyörän irtoaminen voidaan selittää läpän liikutteluvastuksen avulla. Tämä tulkittiin tuolloin normaaliksi venttiilin ominaisuudeksi, kunnes elokuussa 2004 suoritettiin vastaavia kokeita mutta toisella venttiilillä Tornion terästehtaan rakentamalla painekoelinjalla.

Läppäakselilaakereiden ja vaihteen yhteiskitkakertoimeksi saadaan noin 0,7. Luku saadaan seuraavasti $75 \times 40 / (250000 \times 0,0175) = 0,685$ kun läppäakselin halkaisija on $2 \times 17,5$ mm. Laskelmassa ei ole otettu huomioon vaihteen häviötä. Aiheeseen palataan tuonnempana, kun oli havaittu että vain toisessa laakerissa oli mitä ilmeisimmin ollut liukupinnoitteessa vika.

Toisella venttiilillä 1001(?) 0110 08566(?)5 03 (tulkitun numerosarjan mukaan tämä voisi olla palanutta seuraava valmistussarjassa) Torniossa elokuussa 2004 tehdyssä läpän liikuttelukokeessa painekuorman alaisena mitattiin avaamiseen tarvittavaksi momentiksi pieni murto-osa tammikuun kokeeseen verrattuna. Tästä pääteltiin että tammikuussa testatussa venttiilissä 77113 501 015 072666 02 olisi mahdollisesti jotain jumittumista aiheuttavaa vikaa. Luvussa 6.2.3 selostetun laakerivikahavainnon jälkeen etsittiin vielä toista suurivastuksista venttiiliä testaamalla elo-syyskuussa VTT:llä koepenissä venttiilit 77113 501 015 072660 01 sekä 77113 501 015 085685 01, joissa molemmissa läppä liikahti pienellä momentilla. Toisella venttiilillä 501 015 085685 01 suoritettiin mittauksia sekä vaihteen kanssa että ilman sitä. Tällöin todettiin, että vaihteen osuus liikutteluun tarvittavassa momentissa on 43 %, mikä melko tarkasti vastaa ennakoarviota (Lauri Eerikäinen, arvio hyötysuhteeksi noin 0,5).

Tutkimatta on vielä 2 venttiiliä, joista toisessa on läpän toimintaan vaikuttamaton vaurioitunut FS-tiiviste (poimut), ja toinen on painekoelinjan päässä tehtaalla.

Havainto läpän liikutteluvastuksen eroista johti siihen, että tammikuussa koepenissä testattu venttiili päätettiin avata laakereiden tarkastamiseksi, sillä mikään muu kohta ei näyttänyt tarjoavan selitystä läpän liikutteluvastuksen suuruudelle tässä venttiilissä. Kävi ilmeiseksi, että tässä tammikuussa koepenissä testatussa venttiilissä voisi olla laakerivika, joka olisi aiheuttanut jumittumista, mikä puolestaan selittäisi palaneen venttiilikäsiäpyörän irtoamisen sokan katkeamisen seurauksena.

6.2.3 Laakeritutkimus

Kuormituskokeessa tammikuussa käytetty venttiili sahattiin kahdesta kohdasta akseleiden vapauttamiseksi. Ensiöakseli laakeristaan esiin vedettynä on kuvassa 20.

Toisioakseli ja sen holkki on kuvassa 21. Akseli on likainen ja laakeriholkin PTFE-pinnoite osittain rikkoontunut.



Kuva 20. Venttiilin 77113 501 015 072666 02 ensiöakseli holkistaan esille vedettynä. Akseli on puhdas laakeriholkissa olleelta osaltaan ja havaittavan hyväkuntoinen. Ruskea lika on nähtävästi peräisin toukokuun rakopuhalluskokeesta.



Kuva 21. Sahaamalla avatun venttiilin toisioakselin ensiösäteislaakerin holkki ja akseli. Laakeri vioittunut ja akseli likainen. Akselin ulkopäässä vasemmalla päälle kutistettu aksiaalilaakerin holkki.



Kuva 22. Venttiilin toisioakselin ulompi säteislaakeri eli tukiholkki, jonka liukupinnoite on kunnossa. Ensioakselin laakeriholkki on rakenteeltaan samanlainen.

Havainnosta, että toinen päälaakeriholkki on viallinen ja että vaihde vaatii 43 % liikuttelu-momentista, antaa mahdollisuuden arvioida viallisen laakerin kitkakerroin, eli $(1-0.43) \cdot 0,685 \cdot 2 = 0,781$, mikä on metalli-metallikontaktista johtuvaa luokkaa (P. Andersson ja K. Holmberg). PTFE- pinnoitteen puuttuminen laakeriholkista virtauskanavan reunalla ja runsas likaantuminen näyttäisi olevan myös viitteenä siitä, että tiivistetön avoin tasku sallii lian päästä laakeriin sille alueelle, joka kantaa painekuormaa eniten läpän ollessa suljettuna painetta vasten. Osittain hiekkamainen pölylika saattaa olla eräs myötävaikuttava syy pinnoitteen rikkoutumiseen. Tämä voitiin päätellä siitä, että painekoelinjassa suoritettussa kokeessa laakerivastus säilyi avaamiskertojen kanssa lisääntymisestään huolimatta alhaisena. Ilmeisesti laakerit olivat tässä testiventtiilissä vailla vauriota ja ehkä riittävän puhtaita. Suuri liikutteluvastus jo tammikuussa testatussa venttiilissä ennen rakovirtauskokeen suoritusta viittaa siihen, että laakerivian syy on jo ollut läsnä venttiilin ollessa terästehtaan happilinjassa käytössä.

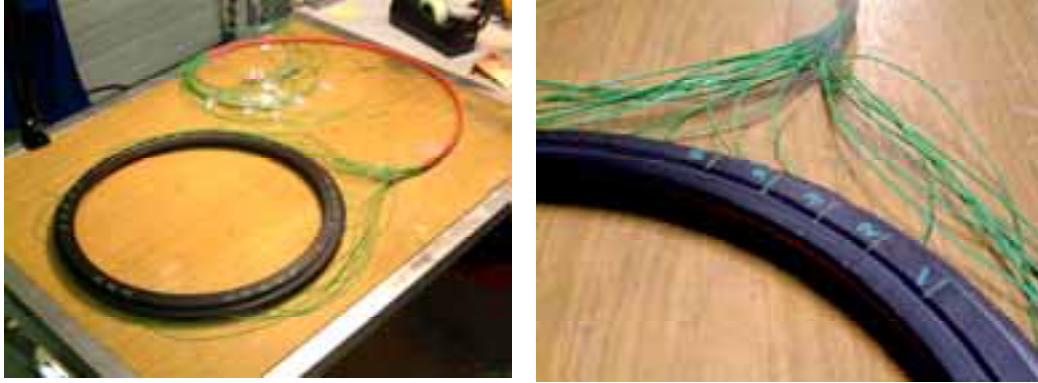
6.2.4 Rakopuhalluskoe Torniossa toukokuussa 2004

Puhalluskoelaitteisto esitetään kuvassa 23. Tutkittava sulkuventtiili oikean kuvan oikeassa alakulmassa.



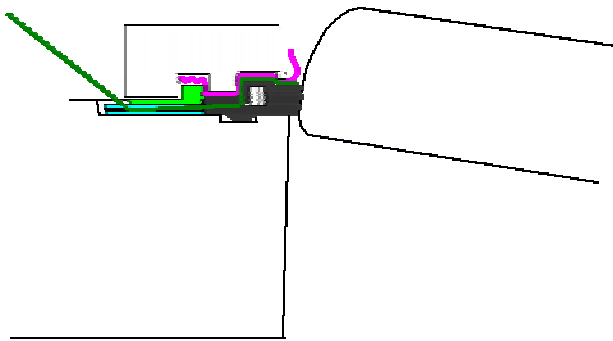
Kuva 23. Puhalluskoelaitteisto Torniossa. Testattava venttiili alhaalla kuvassa hieman oikealla ympyröitynä valkoisella. Valkoinen nuoleen päättävä murtoviiva osoittaa putkistoa, joka lähtee sinisestä paineilmasäiliöstä. Järjestelmässä on lähtöventtiili, koeventtiili sekä loppusulkuventtiili.

Puhalluskoetta (selostus VTT TUO57-044604) varten venttiilin tiiviste varustettiin termoelimillä, joita sijoitettiin metalli- ja PTFE-tiivisteiden väliin kaiken kaikkiaan 26 kappaletta, kuva 24. Niistä noin puolet selvisi venttiilin kiinnittämisestä putkistoon, toisten kokiessa katkeamisen tai oikosulun tiivistelaipan kiristyessä ja johtonipun leikkautuessa läpivientikohdassa, kuva 25. Kaikissa kuudessa päämittaussektorissa toimi kuitenkin ainakin yksi lämpötunnistin.



Kuva 24. Termoelimillä varustettu PTFE tiiviste.

Venttiilin saavuttua takaisin VTT:lle se tutkittiin silmämääräisesti sellaisenaan sekä purkamalla tiivisteasennus. Lämpö likainen takapuoli kuvassa 26.



Kuva 25. Lämpötunnistimen (vihreä johdin) asennus rakopuhalluskokeessa PTFE-tiivisteeseen (tumma) ja FS-suojan (magenta) väliin.



Kuva 26. Venttiili oli näkyvästi likaantunut puhalluskokeessa. Vaaleanruskean pölyliian jakauma selventää jossain määrin kaasun virtausta raottuvan läpän ohi hitaamman virtauksen alueille sekä läpän taakse.

Silmämääräisessä tarkastuksessa kokeen jälkeen havaittiin, että FS-tiivisteiden rako tiivisteiden kiinnitysrenkaaseen vaihteli pitkin kehää. Rako oli suurin läpän akseleiden (napojen) tuntumassa ja pienin läpän raottumisalueilla. Tämä näkyisi olevan seurausta kaasuvirtauksen synnyttämän jäähtymisen ja tiivisteiden välisen kitkan vaikutuksesta, sillä FS-tiivisteiden kutistuminen puhalluksen aikana keskittyy kylmimpiin alueisiin eli raottumisen kohtiin. Kun puhalluksen jälkeen tiiviste jälleen lämpiää ei asennuskitka salli tiivisteiden täysin palautua tapahtuman jälkeen. Jäähtymisen aikainen kutistuminen ei kuitenkaan riittänyt läpän ja FS-tiivisteiden väliseen kosketukseen, sillä hankauksesta olisi pitänyt seurata jälkiä ja nähtävästi myös lämpötilan nousua. Mitään jälkiä hankauksesta ei havaittu.

6.3 Huomioita EIGA:n ja venttiilin valmistajan ohjeistuksesta

EIGA:n (European Industrial Gas Association) ohjeessa "Fire Hazards of Oxygen and Oxygen Enriched Atmospheres" (IGC Doc 04/00/E), on sivun 4 "Examples of Incorrect Operation" luettelossa 4 tapausta venttiilien käyttötavoista, joista voi olla vaaratilanneseuraus. Ne ovat a) paineensäätäjien säätöasetuksen palauttamatta jättäminen venttiilien sulkutoimenpiteen jälkeen, b) venttiilin nopea avaaminen - turbulenssi, c) venttiilin nopeasta avaamisesta seuraava kaasun nopea puristuminen alavirrassa olevan sulkuun, eli käyttötapa sama kuin b, sekä d) happikompressorin käynnistys erheellisesti hapella. Toisaalla suosituksissa "Oxygen Pipeline Systems" (IGC Doc 13/02/E) mainitaan, ettei sulkuventtiiliksi tarkoitettua venttiiliä tulisi käyttää raollaan (throttling) painetta vasten. Perhosventtiili voi olla yksi säätöön soveltumattomasta neljästä mainitusta sulkuventtiiliityypistä, mutta perhosventtiili voi olla EIGA:n mukaan myös säätöön tarkoitettu. Näiden keskeisten esimerkkien valossa pelkästään EIGA:n ohjeet eivät ole käyttäjän kannalta riittävän selkeitä turvallisen käytön varmistamiseksi, sillä löydetynlaista laitevikaantumista ei mainita riskitekijänä. Tosin toimivuuspoikkeamaksi luokiteltava jumittuminen lienee rajatapaus, varsinkin jos siihen liittyy linjalika. Kommentista seuraa, että esim. Painelaitedirektiivin Keskeisten TurvallisuusVaatimusten (Essential Safety Requirements ESR) mukaisesti venttiilin valmistajan olisi määriteltävä venttiilin tyyppi säätöön ehdottomasti soveltumattomaksi sulkuventtiiliksi tai myös säätöön, eli raollaan oloon soveltuvaksi. Valmistajan tehtävänä on vakuuttaa että painelaite on käyttötarkoitukseensa soveltuva, joten niihin kuuluvat ehdot/rajoitukset olisi myös esitettävä. On mahdollista, että valmistajan ohjeiden tulisi käyttöä varten olla huomattavasti selkeämpiä esimerkiksi puhtauden osalta, sillä suojaamaton liukulaakeri näyttäisi olevan arvaamaton riski käyttäjälle.

7 Tulosten tarkastelu

Venttiilin runko näyttää eniten palaneelta läpän toisio- (vapaan) akselin tuntumasta siltä puolelta, jossa läpän puolisko nousee vastavirtaan venttiiliä avattaessa. Tällä venttiilin puoliskolla läpän ja venttiiliseinämän välinen rako on molemmilta reunoiltaan terästä, kun muualla läppää vasten tai läpän yläpuolella on polymeeritiiviste, joka palaa nopeasti pois sytyttyään ja josta tuleva tulisuihku auttaa läppää palamaan. Tämä näkyy tapahtuneen läpän tiivistävällä pinnalla siellä missä läpän puolisko painuu avattaessa myötävirtaan. Täällä läpän palovaurio painottuu toisioakselin tuntumaan.

Runsain venttiilirungon palovaurio heti toisioakselista sivuun läpän vastavirtaan kääntyneessä puoliskossa sekä läpän runsas palovaurio toisioakselin toisella puolella kohdistaa syttymiskohdan etsintää toisioakselin alueeseen. Toisaalta läppä oli suurelta alueelta läpipalanut vastavirtaan kääntyneen puoliskon vaihteen puolelta, mutta muut palovauriot olivat täällä vähäisemmät.

Mikäli syttyminen olisi tapahtunut venttiilin rakenteeseen ja käyttöolosuhteisiin liittyvänä tapahtumaketjuna, olisi hankauskitka todennäköisin mekanismi ja olisi etsittävä hankauskohtia. Aluksi etsittiin läppätiivisteen ja läpän välisestä hankausvuorovaikutuksesta syttymissyitä, jonka todentamiseksi tehtiin nk. puhalluskoe. Koe ei tukenut hankauslämmön syntymishypoteesia läppä-tiivistealueella, sillä mitatut lämpötilan muutokset olivat tiivisteen alueella pääsääntöisesti jäähtymistä.

Toinen hyvin mahdollinen hankauskitka-alue paljastui sitten välivaiheiden kautta läpän toisioakselin laakerista. Yhdestä vahingoittumattomasta venttiilistä löytyi laakerivika juuri toisioakselin puolelta. Tämä oli muiden kokeilujen valossa johtanut suureen läpän avausvastukseen läpän liikuttelukokeissa ilmeisestä laakerivauriosta seuranneen korkean laakerikitkan takia. Havainnot palaneen venttiilin läppäakseleista laakereineen osoittavat sitä, että toisioakselin ensiölaakeri on kokenut palovaurion mutta ensiöakselin vastaava laakeri ei. Näiden havaintojen perusteella on syytä päätellä, että toisioakselin laakeri voisi muodostaa kytöpesän vierimistä seuraavan äkillisen liukumisen aikaisen liukukitkan kuumennettua sitä polymeeripinnoitteen syttymislämpötilaan (luokkaa 500 °C, Lautkaski sekä Eerikäinen). Kuumenemista edistää painekuorman aiheuttama hyvin suuri pintapaine laajahkolla laakerialueella, mikä johtuu tällaisen läppäventtiilin melko pienestä akselista ajatellen luokituspainetta 40 bar ja venttiilin halkaisijan synnyttämää kuormaa, joka on kaikkiaan jopa 280 kN (28 tonnia) jakautuen puoliksi kahdelle akseliosalle. Mikäli avaamistoimenpide on ollut nopea, olisi se ollut omiaan edistämään tätä syttymismekanismia (Lauri Eerikäinen). Nopea liukuminen olisi myös mahdollista vierimistä seuraavan liukumisen aluksi laakerigeometrian takia (Peter Andersson). Tämä syttymissyö liittyisi hankauskitkaan, mutta toisessa muodossa verrattuna laajassa kirjallisuustutkimuksessa (Risto Lautkaski) eriteltyihin hankauskitkalajeihin. Tätä skenaariota tukee ulkoisesti vahingoittumattomista venttiileistä tehty laakerivauriohavainto ja se, että läpän laakerit ovat käytännössä suojattomia kaasun mukana kulkevilta epäpuhtaushiukkasilta. Niiden osuus liukulaakerien PTFE-polymeeripinnoitteen kestävyyyteen jää tosin spekulatioiden varaan, mutta vaikuttaa oikeutetulta päätellä, että osin hiekanjyvämäiset epäpuhtaudet edistävät suojaamattoman laakerin pehmeän polymeeripinnoitteen vaurioitumista.

Muut tarkastellut piirteet palaneessa venttiilissä ja havainnot vahingoittumattomien tutkimuksista eivät ole johtaneet muuhun luultavaan venttiilitekniikkaan liittyvään seikkaan josta olisi voinut seurata mahdollinen syttyminen. Syttymiseen ovat siten voineet myötävaikuttaa akseli-halkaisijan pienuus, laakeroinnin suojaamattomuus ja laakerivauriota edistävän lian esiintyminen.

Mitään vuotoon viittaavaa ei havaittu, mikä olisi voinut selittää venttiilin syttymisen.

8 Johtopäätökset

Palaneen kanssa samanlaisten venttiileiden tutkimuksissa todettiin kaksi selkeää rakennevikaa. Näistä palaneen venttiilin läpän liikerajoittimen lukitusruuvien puuttuminen ei näy välittömästi liittyvän syttymiseen, sillä mitään palopesäkejälkiä ei rajoittimen alueella ole. Toinen rakennevika on läpän toisioakselin (vapaan akselin) laakeriholkin pinnoitteen vikaantuminen, mikä todettiin yhdestä toisesta ulkoisesti vahingoittumattomasta venttiilistä. Sama laakeriholkki oli palaneessa venttiilissä palanut siltä sektorilta, jolla akseli vierii ennen liukumista. Liukukitka oli testatussa laakerivikaisessa venttiilissä suurehko. Tästä seuraa mahdollisuus päätellä syttymiskohdaksi toisioakselin vikaantunut ensiölaakeriholkki, johon kytöpesä on voinut syttyä liukumisen alun tapahduttua aluksi nopeana "raapaisuna" sen jälkeen kun

akseli on vierimällä kiertynyt holkissa. Likaantuminen on nähtävästi edesauttanut suuren liukuvastuksen syntymiseen tai jopa PTFE pinnoitteen nopeaan vaurioitumiseen mikä on johtanut suureen kitkaan. Palokuvio tukee tätä syttymisketjuphoteesia.

9 Yhteenveto

Palaneen happiputkiston sulkuventtiilin tutkimukset ovat koskeneet palaneen venttiilin vaurioita ja teknisiä piirteitä. Venttiilin kiristys putkilinjaan, läpän avaamista helpottavan vaihteen ominaisuudet, venttiilin läpän liikerajoitin sekä palovauriot on kartoitettu soveltuvassa laajuudessa. Edelleen on tutkittu muita samanlaisia venttiileitä sekä kokeellisesti että soveltuvin osin osiksi paloittelemalla. Kokeita on tehty sekä kuormituskoekoneessa että painekoelinjassa Tornion terästehtaalla.

Tutkimusten mukaan on päätelty, että löydetystä venttiilivioista toinen – laakerivika – on mahdollinen syttymisen alkusyy. Laakerivian syntymistä ovat todennäköisesti edistäneet happiputkistosta todetut – myös hiekkamaiset – epäpuhtaudet, mutta laakerirakennekin on pääteltävissä sekä niukasti mitoitetuksi että suojattomaksi esim. lialta. Jos ajatellaan, että venttiiliä avataan tasaamatta paine-eroa, joka synnyttää suuren laakerikuorman on pidettävä mahdollisena, että todettu lika voi kiihdyttää laakerivauriota.

10 Lähdeviitteet

Lautkaski, R. Happiputkistojen syttymissytyt. VTT Prosessit, Päästöjen hallinta. Tutkimus-selostus PRO3/1031/03, 19.12.2003. 37 s.

Lautkaski, R. ja Eerikäinen, L. Tornion venttiilipalon todennäköiset syttymissytyt. VTT Pro-sessit, Ydinvoima ja energiajärjestelmät. Tutkimusselostus PRO1/7045/04. 15 s. + liite 23 s.

Andersson, P. ja Holmberg, K. Suulliset arviot laakereista. VTT Tuotteet ja tuotanto.