

KORKEAPAINEISTEN HAPPI-, ARGON- JA VETYPULLOJEN KÄYTTÄYTYMINEN TULIPALOJEN YHTEYDESSÄ

Pertti Tolonen

Pelastusopisto

Hulkontie 83, 70821 Kuopio

Tiivistelmä

Tällä tutkimuksella haluttiin määrittää tulipalotilanteeseen joutuneiden kaasupullojen räjähdysajat sekä heitteiden kantamat. Samalla pyrittiin määrittämään räjähdysketkellä oleva maksimimaalinen pullopaine (räjähdyspaine) sekä pintalämpötila. Kokeista tehtiin myös DVD-tallenne.

Tutkimuksen perusteella voitiin todeta, että Suomessa esimerkiksi TOKEVA- ja OVA-ohjeissa suositettu 100 metrin turvaetäisyys on ainakin pahimmissa tilanteissa riittämätön. Tehdyissä kokeissa heitteiden arvioitu kantama oli 300 - 350 metriä. Räjähdysaikojen todettiin olevan lyhimmillään alle 6 minuuttia, joten käytännössä aikaa esimerkiksi pullojen täysin turvalliselle siirtämiselle palopaikalta ei juuri ole.

TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA LAAJUUS SEKÄ OSALLISTUJAT

Maanteillämme liikkuu runsaasti korkeapaineisia kaasupulloja sisältäviä kuljetuksia, ja lisäksi kaasupulloja varastoidaan suuria määriä. Tulipalojen yhteydessä kaasupullo voi kuumentua, niin että sisäisen paineen kohoamisen seurauksena sen kuori repeää räjähdysketkensä omaisesti. Mikäli pullon sisältämä kaasu on syttyvää se vielä lisää räjähdysketkensä vaikutusta. Tällaisten tilanteiden yhteydessä palokunnan on turvallisuuden varmistamiseksi tärkeää tietää, mikä on se aika tulipalon syttymisestä, jolloin voidaan turvallisesti lähestyä palopaikkaa ja toimia siellä ennen pullojen räjähtämistä. Lisäksi on voitava määrittää välittömän vaaran alue ja se, kuinka suuri alue on eristettävä, jotta ihmiset ovat turvassa mahdollisessa räjähdysketkessä syntyviltä heitteiltä.

Tällä tutkimuksella pyritään määrittämään palotilanteeseen joutuneiden kaasupullojen räjähdysajat sekä heitteiden kantamat. Hankkeessa olivat mukana Pelastusopisto ja AGA Oy. Molemmat hyödyntävät saatuja tuloksia omassa neuvonnassaan ja koulutuksessaan niille, jotka ovat tällaisten kaasupullojen kanssa tekemisissä. Kohderyhminä ovat esimerkiksi kaasupullojen kuljetuksiin ja käsittelyyn osallistuvat henkilöt sekä pelastusviranomaiset. Tämän raportin lisäksi kokeista haluttiin tehdä DVD-tallenne, jota voidaan käyttää havainnollistettaessa kaasupullojen räjähdysketkiä. Kokeiden suunnittelemiseen ja tekemiseen Sotinpurolla osallistuivat Kari Koivistoinen ja Pertti Tolonen Pelastusopistolta, Olli Haapanen AGA Oy:stä, Markku Jeskanen vakuutusyhtiö IF:stä ja Risto-Matti Raatikainen Savonia-ammattikorkeakoulusta. Pelastusopiston tutkimuspäällikkö Hannu Rantanen toimi projektin ohjaushenkilönä.

KORKEAPAINAISTEN KAASUPULLOJEN REPEÄMISEEN LIITTYVÄÄ TEORIAA

Jotta pystyttäisiin ymmärtämään ja arvioimaan laskennallisesti korkeapaineisen kaasupullon räjähdyksessä syntyvän heitteen kantamaa, siitä aiheutuvaa vahinkoa ja mahdollisesti suunnittelemaan ennakkoon suojaustoimia, on heitteen, sen muodon ja nopeuden väliset yhteydet hyödyllistä tuntea. Tutkimuksessa esitetyt teoreettiset pohdinnat perustuvat soveltuvin osin lähteessä [1] esitettyihin teoreettisiin tarkasteluihin ja tuloksiin.

Paineellisen pullon revetessä laajeneva kaasu tai neste tekee työtä (i) hajottaessaan ja muotoillessaan pullon seinää, (ii) puristaessaan ja työntäessään ympäristön ilmaa ja (iii) kiihdyttäessään heitettä tai heitteitä. Iso osa käytettävissä olevasta energiasta kuluu ilman vastuksen voittamiseen. Tarkastelemalla pullon sisällön heitteelle antamaa energiaa voidaan arvioida heitteen aiheuttamaa potentiaalista vaaraa ympäristölle.

Heitteen koko vaikuttaa merkittävästi sen nopeuteen ja sitä kautta kantamaan. Mitä pienempi on massa, sitä suurempi on kantama. Mikäli heitteen muoto on sellainen, että se kieppuu ilmassa, sen kantama on pienempi kuin sellaisella kappaleella, jolla kieppuminen on lennon aikana vähäisempää. Heitteen kantama voidaan siis edellä olevan mukaisesti teoreettisesti laskea, mikäli saadaan määritettyä sen maksiminopeus.

Nopeuden määrittämiseksi on laskettava heitteen saama energia. Käytännössä laskut ovat monimutkaisia, eikä tässä tutkimuksessa ollut tarkoitus soveltaa esitettyjä kaavoja laskennallisesti.

PAINEEN, TILAVUUDEN JA LÄMPÖTILAN VÄLISET YHTEYDET

Yhdistämällä eri kaasulait saadaan ideaalikaasun tilanyhtälö (Antila 2003):

$$pV = nRT , \tag{1}$$

missä n on moolimäärä, R yleinen kaasuvakio ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ja T lämpötila (K). Kaavassa p on kaasun paine (N/m^2) ja V kaasusäiliön tilavuus (m^3).

Kun tarkastellaan samaa kaasumäärää eri olosuhteissa, voidaan tilanyhtälöä käyttää muodossa

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \tag{2}$$

Todelliset kaasut noudattavat kuitenkin vain likimääräisesti ideaalikaasulakeja. Paineen ollessa pieni (alle 1 MPa) monet kaasut noudattavat melko tarkasti ideaalikaasulakeja mutta paineen kasvaessa poikkeama kasvaa. Suurissa paineissa ideaalikaasun tilanyhtälö antaa tulokseksi liian pienen tilavuuden ja lämpötilan kasvaessa virhe vastaavasti pienenee.

Reaalikaasut poikkeavat ideaalikaasuista siten, että niiden molekyyileillä on äärellinen koko ja molekyylien välillä on vuorovaikutusta myös silloin, kun ne eivät törmää. Reaalikaasun käyttäytymistä voidaan tarkastella Van der Waalsin tilanyhtälöllä:

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT, \quad (3)$$

missä termi $\frac{an^2}{V^2}$ ottaa huomioon molekyylien väliset vuorovaikutukset ja nb huomioi molekyylien tilavuudet ja kertoimet a ja b ovat Van der Waalsin vakioita (Taulukko 1.).

Taulukko 1. Korjauskertoimen arvoja tutkituille kaasuille

Kaasu	a [Pa m ⁶ / mol ²]	b [m ³ /mol]
O₂	0,137	0,0000318
Ar	0,135	0,00003219
H₂	0,025	0,00002612

KOKEISSA KÄYTETTYIHIN KAASUIHIN LIITTYVIÄ TOIMINTAOHJEITA PALO- JA RÄJÄHDYSTILANTEISSA

Happivuodon ylläpitämä palo on kiivas ja vaikeasti sammuttavissa. Tulipalon sammutukseen käytetään kyseessä olevan palavan materiaalin sammutukseen sopivia sammutusaineita. Jos liekki koskettaa happipulloa, se voi revetä kuumentuneen teräksen heikkenemisen johdosta. Pullon kappaleet voivat lentää noin 100 metrin etäisyydelle. Alue on eristettävä sekä vuoto suljettava, jos sen voi tehdä turvallisesti. Siirretään muut pullot etäämmälle, jos niitä voi käsitellä paljain käsin. Jos pulloja ei voi siirtää, jäähdytetään niitä valelemalla mieluummin tuetulla suihkulla suojatusta paikasta. Lisäksi sammutetaan palo [3].

Argon ei pala, joten ei tarvita mitään erikoisia palontorjuntajärjestelmiä eikä laitteita. Jos on mahdollista, siirretään kaasupullot turvaan. Tarvittaessa kaasupulloja suojataan kuumenemiselta räjähdysvaaran välttämiseksi [4].

Vety on väritön ja hajuton, erittäin helposti syttyvä kaasu. Vety reagoi kiivaasti halogeenien ja useimpien halogeeniyhdisteiden kanssa. Vety palaa erittäin kuumalla ja lähes näkymättömällä vaaleansinisellä liekillä. Päivänvalossa voi ehkä havaita liekin synnyttämän ilman väreilyn. Liekki havaitaan helpoimmin kiinnittämällä paperia, kangasta tai muuta helposti syttyvää materiaalia kepin päähän ja viemällä se oletetun vuotokohdan lähelle. Vetyliekin kosketus sytyttää materiaalin palamaan [3].

Vetyliekin kosketus sulattaa useimmat metallit. Jos liekki koskettaa pulloa tai säiliötä, se voivat revetä jo muutaman minuutin kuumennuksen jälkeen. Pullojen ympäristö eristetään 100 metrin ja säiliön 200 metrin säteellä [3] Liekin sammutuksessa voidaan käyttää jauhesammutinta [5].

KOKEIDEN TOTEUTUS

Kokeilla tutkittiin yksittäisten kaasupullojen räjähdysaikoja ja heitteiden käyttäytymistä sekä kantamaa tulipalossa sekä selvitettiin näiden pullojen käyttäytymistä kuljetuskorissa vastaavassa tulipalotilanteessa. Lisäksi tutkittiin räjähtääkö pullo ulkopuolisen pistoliekin vaikutuksesta. Fysikaalisista suureista mitattiin kaasupullon sisäinen paine sen kuumentuessa ja samalla pullon ulkopinnan lämpötila. Kokeet päätettiin myös kuvata ja tehdä niistä DVD-tallenne, jota voitaisiin käyttää esimerkiksi opetuksen yhteydessä.

Tulipalon simulointia varten valmistettiin teräsaltat, joihin tutkittavat pullot laitettiin. Altaisiin laitettiin polttoaineeksi polttoöljyä sekä lastulevyä, joita polttamalla pullot saataisiin kuumenemaan riittävästi. Seuraavassa testeistä saadut tulokset.

Koe 1. Happipullon kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 12 min 35 s
 - o heitteiden kantama: pienet 250 m , isot 100 m

Koe 2. Happipullon kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 9 min 20 s
 - o heitteiden kantama: pienet 60 m, isot 90 m
 - o pullon maksimipaine: 360 bar
 - o pullon maksimipintalämpötila: 80 °C

Koe 3. Argonpullon kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 7 min 30 s
 - o heitteiden kantama: pienet 350 m, isot 300 m
 - o pullon maksimipaine: 490 bar
 - o pullon maksimipintalämpötila: 140 °C.

Koe 4. Vetypullon kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 6 min 40 s
 - o heitteiden kantama: pienet (ei löytynyt), isot 100 m.

Koe 5. Vetypullon kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 8 min 10 s
 - o heitteiden kantama: pienet (ei löytynyt), isot 100 m
 - o pullon maksimipaine: 400 bar
 - o pullon yläosan maksimipintalämpötila: 640 °C (laski ennen räjähdystä 380 °C:een).

Koe 6. Argonpullon kuumentaminen lappeellaan

- Mitattiin
 - o pullon räjähdysaika: 8 min 40 s
 - o heitteiden kantama: pienet 70 m, isot 150 m.

Koe 7. Täyden pullokorin (6 happi- ja 6 argonpulloa) kuumentaminen

- Mitattiin
 - o pullojen räjähdysaika: 6 min 21 s (argonpullo)
 - o heitteiden kantamaa: pienet (ei löytynyt), isot 80 m.
- Testattiin
 - o korin ja pullojen sinkoutumista ympäristöön: räjähtäneen argonpullon pääosa lensi 80 m:n päähän, muut pullot sinkoutuivat kokonaisina 10 metrin säteelle. Neljä pulloa oli vielä pääosin korissa, kori oli vaurioitunut pahasti ja kaksi sen seinää oli sinkoutunut paikaltaan (ei löytynyt).

Koe 8. Pistoliekillä (propani) happipullon (50 l) kuumentaminen

- Mitattiin
 - o happipullon räjähdysaika: ei räjähtänyt
- Testattiin
 - o pistoliekin lämmön riittävyttä räjäyttämään happipullon: ei riittänyt.

Taulukko 2. Testattujen kaasujen kriittisiä paineita, mitattu räjähdyspaine ja siitä laskettu räjähdyslämpötila [6]

Kaasu	Räjähdyslämpötila	Räjähdyspaine	Kriittinen paine
Argon	276 °C	490 bar	486 bar
Happi	122 °C	360 bar	508 bar
Vety	262 °C	400 bar	130 bar

Laskennallisten räjähdyslämpötilojen poikkeaminen mitatuista pintalämpötiloista selittyy ainakin osittain termoparin ja kaasupullon välisistä kontaktihäiriöistä. Mitatut pintalämpötilat ovat alhaisempia kuin laskennalliset räjähdyslämpötilat argonin ja hapen osalta, mutta antavat kuitenkin jotain suuntaa. Vetypullon kohdalla on todennäköistä, että liekit ovat lämmittäneet lämpötilanturia, jolloin selittyy jopa 650 °C:n lämpötila. Liekin lämpötila on kyseisissä järjestelyissä ollut noin 1000 °C [6]

Teräksinen kaasusäiliö alkaa haurastua nopeasti lämpötilan noustessa yli 500 °C:n, minkä jälkeen pullo voi revetä muutamassa minuutissa [7].

SAATUJEN KOETULOSTEN TARKASTELU

Mitatut pullojen pintalämpötilat kuumennuksen aikana kuvaavat lähinnä liekin ja pullon yläosan ilman lämpötilaa, sillä mittauksessa käytettyjen termoparien johtojen päitä ei saatu kunnolla kiinnitettyä pullojen pintaan eikä niitä saatu eristettyä liekeiltä. Johdon päät sijoitettiin heti pullon kaulan alaosaan. Kuitenkin voidaan olettaa, että pullon ulkopinnan lämpötila on lähellä mitattua arvoa anturin korkeudella. Hapen osalta mittaustulos voidaan katsoa merkityksettömäksi, koska pullon kaaduttua vain pohjaosa jäi liekkeihin ja anturi oli näin astian ulkopuolella.

On mahdollista, että happipullon kaatuessa paineputken ja pullon liitokseen tuli vuoto. Mittauskäyristä voidaan nähdä, että happipullon painemaksimi on pieni verrattuna argonilla ja vedyllä saatuu arvoon. Paineikäyrässä ei kuitenkaan näy mitään selkeitä epäjatkuvuuskohtia, mikä viittaa siihen, ettei mahdollinen paineen vuoto ole ollut ainakaan nopea. Argonilla ja vedyllä saadut

paineenmittauskäyrät vaikuttavat realistisilta ja niiden maksimit räjähdyshetkellä suuruusluokaltaan samanlaisia kuin kyseisten pullojen valmistajan ohjeissakin on.

Heitteiden etäisyyksiä määritettäessä jouduttiin turvautumaan myös silmämääräiseen arvioon, koska kaikkia heitteitä ei löydetty maastosta. Tällöin virheeksi 300 metrin matkalla tulee helposti 50 - 100 metriä.

Pullot sirpaloituivat arvion mukaan 2 - 4 osaan ja kaikkia kappaleita ei löydetty maastosta. Pienet heitteet lensivät silmämääräisen arvion mukaan jopa 350 metrin päähän räjähdyspaikasta ja suuriakin 300 metrin vaiheille. Nykyisissä OVA- ja TOKEVA-ohjeissa turvaetäisyydeksi tulipalotilanteessa hapelle ja vedylle on määritetty 100 metriä. Tehdyissä kokeissa räjähtäneen happipullojen heitteitä lensi 250 metrin ja vetypullon 100 metrin paikkeille. Argonia ei mainita OVA-ohjeissa, mutta pullokuljetuksissa on yleensä mukana myös argonpulloja. Sen heitteiden kantamat olivat tehdyissä kokeissa enimmillään 300 - 350 metriä. Tehdyt havainnot heitteiden kantamista vahvistavat käsitystä, että kaasupullo räjähtäessään lähtee pituusakselinsa suuntaan, jolloin pystyssä olevan pullon kappaleet lentävät pidemmälle kuin kaatuneen pullon.

Räjähdysajat olivat mittauksissa 6 min 21s - 12 min 35 s sytytyksestä. Räjähdysaikoja ei ohjeissa ole mainittu, ja ne tietysti riippuvatkin aina kulloisestakin palotilanteesta.

Lyhin räjähdysaika saatiin pullokorikokeessa, jossa räjähtänyt pullo sisälsi argonkaasua. Tässä kokeessa myös kori rikkoontui ja sen osat kuten muut pullotkin sinkoutuivat lähiympäristöön. Pullokorien yhteydessä ulkoilma ei pääse viilentämään pulloja samalla lailla kuin yksittäisten pullojen kohdalla, ja tästä aiheutunee lyhin räjähdysaika. Pistoliekkikokeet osoittivat, ettei liekin antama lämpö määrä välttämättä riitä ainakaan ulkotilassa (kokeiden aikana lämpötila +4 °C) nostamaan kaasupullon painetta riittävästi, jotta se räjähtäisi.

YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

Tutkimuksen päätarkoitus oli selvittää tietyille, kuljetusten näkökohdista katsottuna kolmelle yleiselle kaasulle, hapelle, argonille ja vedylle räjähdysajat ja heitteiden kantamat tulipalotilanteessa. Saatuja tuloksia on tarkoitus käyttää ohjeistuksessa ja neuvonnassa. Kokeiden määrä oli käytännön rajoitusten takia varsin pieni, ja siksi jotkut asiat vaativat vielä lisätutkimuksia.

Tutkimuksen perusteella nykyisten virallisten ohjeiden mukaiset varoetäisyydet eivät ole riittäviä, mikäli halutaan täysin varmistua ympäristön turvallisuudesta tulipalotilanteessa. Varoetäisyyksien tarkentaminen vaatisi vielä lisää kokeita, mutta jo näidenkin kokeiden perusteella maksimikantamat voivat olla 300 - 350 metriä. Toisaalta on ongelmallista lisätä varoetäisyyksiä niin suuriksi, ettei niitä käytännössä pystytä järkevästi soveltamaan.

Pullon ulkopinnan ja räjähdyslämpötilan selvittäminen vaatisi vielä tarkempia lisätutkimuksia. Tämä olisi tarpeellista, koska nämä koetulokset antaisivat viitteitä siitä, että pullon rikkoutumiseen johtava lämpötila voi olla alhaisempi kuin esimerkiksi nyrkkisääntönä käytetty 350 °C:n lämpötila.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin teoreettisen tiedon ja käytännön välistä yhteensopivuutta melko pinnallisesti. Näin pienillä koemäärillä sitä ei tietysti kovin syvällisesti voi tehdä, ja lähinnä siihen saatiin taustatietoa, mitkä seikat vaikuttavat esimerkiksi heitteiden kantamiin.

Täydellä pullokorilla tehty koe osoitti, että vaikka se johtaisi siinä vain yksittäisenkin pullon räjähtämiseen, vaaraa voi heitteiden lisäksi aiheuttaa pullojen sinkoileminen lähiympäristöön. Tämä seikka on tietysti huomioitava tulipalotilanteessa.

Korkeapaineisten kaasupullojen käyttäytyminen eri onnettomuustilanteissa vaatisi lisätutkimuksia. Yhtenä tutkimuksen kohteena voisi olla pullojen käyttäytyminen tilanteessa, jossa pullon venttiili katkeaa. Lisätutkimista vaatisi myös se, miten suuri määrä kaasupulloja käyttäytyy tulipalotilanteessa. Nyt tutkittiin yksittäisellä kokeella täyden pullokorin pullojen käyttäytymistä tulipalotilanteessa. Mutta entäpä jos kyseessä onkin koko kuorma pullokoreja, kuten normaalisti kuljetuksessa on.

Pullojen räjähdysajat osoittautuivat lyhyiksi. Testien mukaan, pahimmissa tapauksissa turvalliseen oleskeluun välittömästi onnettomuuspaikan lähellä ei ole kuutta minuuttia pitempää aikaa palon alkamisesta. Tämäkin seikka on tietysti otettava huomioon pelastustoiminnassa.

Tilanne, jossa pistoliekki kuumentaa kaasupulloa, ei johda vähäisen lämmitystehon takia helposti räjähdykseen, ainakaan lyhyen ajan kuluessa. Lisäkokeilla voisi tutkia tilannetta, jossa käytettäisiin asetyleeniliekkiiä tai olisi useita pistoliekkejä. Ilmalla rikastetun nestekaasun pistoliekin lämpötila on noin 1500 °C, kun asetyleeniliekillä lämpötila voi nousta jopa 3000 °C:een.

Tutkimus tehtiin Pelastusopiston tutkimusyksikön projektina yhteistyössä AGA:n kanssa. Tämän tyyppisten kokeiden tekeminen edellyttää riittävän suurta maa-aluetta, missä kokeet voidaan tehdä turvallisesti. Puolustusvoimien harjoitusalue Nurmeksen Sotinpurossa soveltuisi nyt ja aiemmin saatujen kokemusten mukaan erinomaisesti edellä mainittujen jatkokokeiden suorituspaikaksi. Kiitokset Puolustusvoimille mahdollisuudesta käyttää aluetta testauspaikkana sekä testien aikana saadusta avusta käytännön järjestelyissä. Lisäksi erityiskiitokset tekniikan tohtori Sakari Halmemiehelle hyvistä huomioista tuloksia analysoitaessa ja tutkimuspäällikkö Hannu Rantaselle projektin ohjaamisesta.

LÄHDELUETTELO

1. Baum, M.R. 1988. Disruptive Failure of Pressure Vessels: Preliminary Design Guidelines for Fragment Velocity and the Extent of Hazard Zone. Journal of Pressure Vessel Technology. May 1988, Vol 110.
2. Antila, A-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H. ja Pohjakallio, M. 2003. *Tekniikan kemia*. EDITA. Helsinki.
3. OVA 2006. Onnettomuuden Vaaraa aiheuttavat Aineet-turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet). <http://www.occuphealth.fi/internet/ova/index.html>. Sivulla käyntipäivämäärä 24.7.2006.
4. AGA 2005. Teollisuuskaasut. Tuoteluettelo.
5. Haapanen, O. 2006. Ins. Olli Haapasen tiedonanto, 29.5.2006, AGA.
6. Halmemies, S. 2006. TkT Sakari Halmemiehen tiedonanto, 30.5.2006, Lahden ammatti-korkeakoulu.
7. Lautkaski, R. 2006. TkL Risto Lautkasken tiedonanto, 29.5.2006, VTT.