



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Juha Valkama

RÄJÄHDYSVAARALLISEN TILAN PAINENKEVENNYS

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Reijo
Karvinen, Yliopistonlehtori Seppo
Syrjälä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 31. toukokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknisten tieteiden tiedekunta

JUHA VALKAMA: Räjähdyksvaarallisen tilan paineenkevennys

Diplomityö, 52 sivua, 0 liitesivua

Elokuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energiatehokkuus

Tarkastaja: Professori Reijo Karvinen, Yliopistonlehtori Seppo Syrjälä

Avainsanat: ATEX, räjähdysvaarallinen tila, paineenkevennys, kaasuräjähdyks

Valtioneuvoston asetus 856/2012 vaatii, että räjähdysvaaralliset tilat eli niin sanotut ATEX-tilat on suunniteltava niin, että räjähdyksessä syntyvä paine on voitava purkaa turvallisesti kevyiden rakenteiden kautta tai paineenkevennyslaittein. Tässä diplomityössä käytiin läpi mitä vaatimuksia lainsäädäntö asettaa paineenpurkamiselle räjähdysvaarallisista tiloista. Lisäksi perehdyttiin räjähdysten teoriaan ja esitettiin räjähdystä hallitsevat yhtälöt.

Soveltavassa osassa suoritettiin CFD-virtaussimulointi ANSYS Fluent -laskentaohjelmistolla. Suoritettiin ajasta riippuva simulointi palamiselle vakiotilavuudessa, jolla kuvattiin kaasupilven räjähtävää palamista. Simuloinnin tuloksena saatiin paineen nousunopeudelle arvo metaani-ilmaseokselle ja propaani-ilmaseokselle. Räjähdyksipaineen nousunopeudesta saatiin johdettua räjähdystä kuvaavan räjähdysvakion arvo. Räjähdyksivakiota käytetään standardeissa parametrina räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelussa.

Simuloituja räjähdysvakion arvoja vertailtiin kokeellisiin tuloksiin ja korrelaatioiden antamiin tuloksiin. Tulosten perusteella virtaussimulointia voidaan käyttää räjähdysvakion arvon määrittämiseen.

Lopuksi käytiin läpi standardien mukaisia paineenkevennyslaitteita ja laskettiin standardien mukaisesti perusvaatimuksia, jotka liittyvät kaasuräjähdyksiltä suojaaviin järjestelmiin case-esimerkin avulla.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

The Faculty of Engineering Sciences

JUHA VALKAMA: Pressure relief for explosive atmospheres

Master of Science Thesis, 52 pages, 0 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Program in Mechanical Engineering

Major: Energy Performance

Examiner: Professor Reijo Karvinen, University lecturer Seppo Syrjälä

Keywords: ATEX, explosive atmosphere, pressure relief, gas explosion

Finnish law demands that hazardous areas must be designed in such a way that explosive pressure can be safely discharged through light structures or pressure relief devices. This thesis examines the requirements of legislation regarding pressure relief in hazardous atmospheres. The theory of explosion was introduced and the governing equations of the explosion were presented.

CFD flow simulation was performed with ANSYS Fluent simulation software. The simulation carried out a time-dependent simulation of the combustion in a constant volume describing explosive combustion. As a result of the simulation, the value of the pressure rise rate was obtained for the methane-air and the propane-air mixture. The explosion index that depicts the explosion was derived from the pressure rise rate. The explosion index is used as a standard parameter for the design of hazardous atmospheres.

Simulated explosion index values were compared to experimental results and theoretical equations results. Based on the results flow simulation can be used for evaluation the explosion index value.

Finally, standard explosion venting systems were introduced. The basic requirements regarding explosion venting systems were calculated according to standards in the case example.

ALKUSANAT

Diplomityöni on tehty Tampereen teknillisen yliopiston kone- ja tuotantotekniikan laitoksella tammikuun 2017 ja elokuun 2017 välisenä aikana. Diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston säätiön rahoittamana.

Tämän työn perustana on ollut Tampereen teknillisellä yliopistolla saamani opetus ja haluan kiittää professori Reijo Karvista opetuksesta ja työni ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää Seppo Syrjälää ja kaikkia muita Tampereen teknillisen yliopiston energiatekniikan ja lämpötieteiden opetukseen osallistuneita henkilöitä mielenkiintoisista luennoista. Lisäksi kiitän AX-Suunnittelua ja Krister Koivulaa työni ohjaamisesta.

Haluan myös kiittää perhettäni ja ystäviäni saamastani tuesta ja kannustuksesta opiskelujeni ajalta.

Tampereella, 2.8.2017

Juha Valkama

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LAINSÄÄDÄNTÖ	2
2.1	Valtioneuvoston asetus 856/2012.....	2
2.2	ATEX-lainsäädäntö	2
2.2.1	Räjähdyksivaaralliset tilat	4
2.2.2	Ex-laitteet	4
2.2.3	Räjähdyksen ennaltaehkäisy.....	6
2.2.4	Räjähdyksen vaikutusten vähentäminen	7
2.2.5	Räjähdyssuojasiasiakirja.....	8
3.	KAASUPILVIRÄJÄHDYKSEN TEORIAA.....	10
3.1	Detonaatio	10
3.2	Humahdus/Deflagraatio	10
3.3	Virtausta hallitsevat yhtälöt.....	11
3.4	Paineaallon muodostuminen suljetussa tilassa	16
3.5	Osittaisen kaasupilven räjähdyspaineen arviointi suljetussa tilassa	19
3.5.1	Adiabaattinen sekoitusräjähdysmalli	19
3.5.2	Normaalijakautunut räjähdysmalli.....	21
3.6	Kaasujen syttyvyysominaisuuksia.....	23
4.	CFD-MALLINNUS	26
4.1	Tilan mallinnus.....	26
4.2	Laskentaverkko.....	26
4.3	Osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen.....	27
4.4	Mallinnuksen reunaehdot.....	28
4.5	Turbulenssin mallinnus.....	28
4.6	Palamismalli	29
4.6.1	Eddy Dissipation Model (EDM).....	29
4.6.2	Eddy Dissipation Concept (EDC).....	29
4.7	Mallinnettavat tilanteet	30
5.	LASKENTATULOKSET	31
5.1	Simulointi.....	31
5.2	Metaani-ilmaseos.....	31
5.3	Propaani-ilmaseos.....	32
5.4	Tulosten verifiointi	33
6.	PAINEENPURKUTEKNIIKAT	35
6.1	Vallitsevat standardit	35
6.2	Räjähdyksipaineen kevennyslaitteiden rakenteita	35
6.2.1	Painovoimaisesti kuormitettu kevennysluukku	36
6.2.2	Jousikuormitettu kevennysluukku	36
6.2.3	Nurjahtavaan sauvaan perustuva kevennysluukku	37

6.2.4	Murtolevyllä varustettu kevennysluokka	39
6.2.5	Ponnahduslevy	40
6.2.6	Vastapainetuki	41
6.2.7	Suuntauslevyt.....	42
6.2.8	Paineenkevennys rakenteellisin keinoin.....	43
6.3	Paineennousun kesto rakenteissa.....	43
6.4	Case-esimerkki	45
6.4.1	Kevennysaukon arviointi.....	45
6.4.2	Rekyylivoima.....	46
6.4.3	Painevaikutus.....	46
6.4.4	Liekin vaikutus	47
6.4.5	Paineenkevennysaukon mitoitusravot.....	47
7.	YHTEENVETO.....	48
8.	LÄHTEET	50

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ANSYS Workbench	Tietokoneavusteinen mallinnus- ja suunnitteluohjelmisto.
ANSYS Fluent	Tietokoneohjelmisto numeerisen virtausdynamiikan ratkaisemiseen.
ATEX	AT mosphères EX plosibles. Lainsäädännön ja standardisoinnin alue, joka koskee räjähdysvaarallisia tiloja ja tiloissa käytettäviä laitteita.
CFD	Computational fluid dynamics. Numeerinen virtausdynamiikka, jossa numeerisilla menetelmillä mallinnetaan kaasujen ja nesteiden käyttäytymistä.
Gaseq	Kemiallisen tasapainon laskentaohjelma
LFL	Lower flammability limit, alempi leimahdusraja.
Mathcad	Laskentaohjelmisto
SFS	Suomen standardisoiimisliitto
SI-järjestelmä	ransk. <i>Système international d'unités</i> , kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
SolidWorks	3D-Suunnitteluohjelmisto
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UFL	Upper flammability limit, ylempi leimahdusraja.
A	pinta-ala
a	kiihtyvyys
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa
c_v	ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa
C	pitoisuus
E	kimmokerroin
F	voima
g	normaali putoamiskiihtyvyys
h	entalpia
I	jäyhyysmomentti
K_G	kaasun räjähdysvakio
L_n	nurjahduspituus
M	moolimassa
m	massa
n	ainemäärä
P	paine
q	lämpövuoto
R	kaasuvakio
r	säde
S	palamisnopeus
T	lämpötila
t	aika

U	sisäenergia
u	nopeus
V	tilavuus
x	pituus
Y	massaosuus
δ_{ij}	Kroneckerin delta $\delta_{ij} = 1$, jos $i=j$, muuten $\delta_{ij} = 0$
$\dot{\omega}$	reaktionopeus
ρ	tiheys
τ	leikkausjännitys
ν	ominaistilavuus
γ	lämpökapasiteettien suhde c_p/c_v
Φ	yleinen muuttuva suure

1. JOHDANTO

Valtioneuvoksen asetuksen räjähdyskelpoisen ilmaseoksen vaaran torjunnasta (576/2003) tarkoitus on pitää yllä yleistä turvallisuutta ja suojella työntekijöitä henkilö- ja omaisuusvahingoilta räjähdysvaarallisten tilojen yhteydessä. Aineita, jotka voivat muodostaa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen käytetään erityisesti teollisuudessa, mutta myös esimerkiksi energiantuotantolaitoksissa, sairaaloissa ja oppilaitoksissa. Räjähdysvaaraa pyritään ensisijaisesti estämään eliminoimalla räjähdysvaarallisten ilmaseosten muodostuminen tai ilmaseosten syttyminen. Räjähdysvaarallinen tila tulee kuitenkin suunnitella niin, että räjähdysten esiintyessä räjähdysten vaikutuksia saadaan vähennettyä käyttämällä räjähdysvaarallisiin tiloihin suunniteltuja laitteita.

Euroopan unionin ATEX-direktiivit koskevat työolosuhteita ja laitteita, joita käytetään räjähdysvaarallisissa tiloissa. Direktiivit ovat pohja kansalliselle lainsäädännölle ja standardeille. ATEX-direktiivien mukaisesti suunniteltuja laitteita voidaan käyttää turvallisesti EU-alueella ja laitteiden valmistajat takaavat tuotteiden ominaisuudet räjähdystilanteissa. Räjähdysvaarallisissa tiloissa tulee käyttää vain laitteita, jotka ovat ATEX-direktiivien mukaisia.

Tässä työssä esitellään säädöksiä ja standardeja, jotka koskevat räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelua räjähdysten paineenpurun osalta. Standardien avulla voidaan mitoittaa sopivat laitteet räjähdysvaarallisten tilojen paineenpurkuun.

Paineenpurun suunnittelussa on oleellista tuntee räjähdysten dynamiikka. Paineenkevennyslaitteen avautumispaine, räjähdyspaineen nousunopeus ja räjähtävän aineen ominaisuudet ovat räjähdysvaarallisen tilan suunnittelun paineenkevennyksen kannalta keskeisimmät suunnittelumuuttujat. Diplomityö keskittyy näiden kolmen suunnittelumuuttujan ympärille. Tarkastelu rajataan kaasuräjähdysiin muissa kuin maanalaisissa laitoksissa.

Diplomityön toisessa luvussa käsitellään lainsäädäntöä, joka koskee räjähdysvaarallisen tilan suunnittelua ja toteutusta. Luvussa 3 käydään läpi räjähdysten teoriaa. Luvussa 4 esitellään simulointimalli, jolla voidaan numeerisella virtauslaskennalla arvioida paineen nousunopeuden arvoa. Luvussa 5 vertaillaan kokeellisia, simuloituja ja teoreettisten mallien antamia tuloksia räjähdyspaineen nousunopeudelle. Luvussa 6 esitellään standardien mukaisia räjähdyspaineen kevennyslaitteita ja lasketaan standardien mukaisesti paineenkevennysalalle arvo case-esimerkissä.

2. LAINSÄÄDÄNTÖ

Tässä luvussa käydään läpi taustaa työlle lainsäädännön kautta. Käydään läpi työn motivaationa oleva asetus, joka määrää ottamaan huomioon räjähdysvaarallisen tilan paineenkevennyksen ja räjähdysten toteutuessa paineaallon turvallisen purkautumisen. Käydään läpi miten ATEX-direktiivit tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ja toteutettaessa räjähdysvaarallisia tiloja.

2.1 Valtioneuvoston asetus 856/2012

Niin sanottu kemikaaliturvallisuusasetus 856/2012 vaatii, että räjähdystilanteessa paineen nousun tulee voida purkautua räjähdystilasta niin, että mahdolliset henkilövahingot saadaan minimoitua (Asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista 20.12.2012/856 37 §).

37 § Rakennuksen paineenkevennys

Jos huonetilassa käsitellään syttyviä kaasuja, syttyviä nesteitä (kategoria 1–2) tai 14 §:ssä tarkoitettuja kemikaaleja tai jos prosessiin muuten liittyy räjähdysvaara, tilan painetta tulee voida keventää joko kevytrakenteisten rakenteiden kautta tai paineenkevennyslaittein siten, että räjähdyksessä syntyvä paine voi purkautua ulos suuntaan, jossa henkilövahinkojen mahdollisuus jää mahdollisimman vähäiseksi. (21.5.2015/686)

Rakennukseen sijoitetussa räjähtävän kemikaalin varastossa ja käsittelytilassa tulee vähintään yhden varaston seinistä olla rakennuksen ulkoseinä.

Asetus vaatii, että räjähdystilanteessa tilat, joissa käsitellään syttyviä nesteitä tai kaasuja tai prosessiin muuten liittyy räjähdysvaara, on suojattava erillisten paineenkevennyslaitteiden avulla tai kevytrakenteisten rakenteiden avulla. Kevytrakenteisiä rakenteita ovat muun muassa ikkunat ja ikkunan karmit, heikennetyt nurkat, kevytrakenteiset seinät tai muut kevyet rakenteet, joiden kautta paineen purku voidaan suorittaa. Esimerkiksi ikkunoiden käyttö paineenpurkausaukkona voi kuitenkin aiheuttaa sirpalevaikutuksen ympäristöön, joten kevytrakenteisen paineenpurkausaukon materiaali ja mahdollinen sirpalevaikutus tulee suunnitella turvallisesti. Räjähdysvaaraa ja paineenpurkua tulee käsitellä kokonaisvaltaisesti niin, että saavutetaan mahdollisimman turvallinen ympäristö räjähdysvaarallisiin tiloihin ja tilojen ympäristöön.

2.2 ATEX-lainsäädäntö

Räjähdysvaarallisia tiloja ja tiloissa käytettäviä laitteita koskevat lait ja standardit perustuvat Euroopan parlamentin ATEX-laitedirektiiviin (2014/34/EU) ja ATEX-työolosuhdedirektiiviin (99/92/EY). ATEX-direktiivit kytkeytyvät toisiinsa niin, että työolosuhdedirektiivi edellyttää, että räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävät laitteet,

työvälineet ja suojausjärjestelmät on valittava ATEX-laitedirektiivissä esitettyjen vaatimusten mukaisesti. Suomessa ATEX-työolosuhdedirektiivi on saatettu voimaan kansallisella valtioneuvoston asetuksella (576/2003) räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta. ATEX-laitedirektiivi on saatettu Suomessa voimaan kansallisella lailla (1139/2016) räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettujen laitteiden ja suojausjärjestelmien vaatimustenmukaisuudesta ja valtioneuvoston asetuksella (1439/2016) räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettujen laitteiden ja suojausjärjestelmien vaatimustenmukaisuudesta.

Valtioneuvoston asetuksen (576/2003) tarkoituksena on ennaltaehkäistä ja torjua räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamat vaarat. Asetuksen perusteella räjähdysvaaraa tulee arvioida ja ennaltaehkäistä. Asetus määrittää vähimmäisvaatimukset, joilla parannetaan työntekijöiden turvallisuutta ja terveyttä tiloissa, joissa voi esiintyä räjähdyskelpoista ilmaseosta. Räjähdysvaaran arvioinnissa tulee ottaa huomioon vähintään todennäköisyys räjähdyskelpoisen ilmaseoksen muodostumiselle, ilmaseoksen syttymislähteet kuten laitteistot ja prosessit, käytetyt aineet ja mahdollisen räjähdysvaaran vaikutusten laajuus. Asetuksen perusteella tilat, joissa voi esiintyä räjähdyskelpoista ilmaseosta, tulee luokitella vaarallisuuden mukaan. Työnantajan on huolehdittava, että luokitelluissa tiloissa työskentelevät ihmiset on koulutettu asianmukaisesti, työvälineet ovat ATEX-lain mukaisia ja kaikki vaaditut räjähdysvaarastoimenpiteet on tehty vaaran arvioinnin mukaisesti. Asetus velvoittaa työnantajan estämään ja suojautumaan mahdollisilta räjähdyksiltä estämällä mahdollisuuksien mukaan räjähdyskelpoisen ilmaseoksen muodostuminen. Jos räjähdyskelpoista ilmaseosta pääsee toiminnan luonteesta johtuen syntymään, on ilmaseoksen syttymisen mahdollistavia syttymislähteitä vältettävä räjähdysvaarallisessa tilassa. Jos räjähdys tapahtuu, on tila suojattava niin, että työntekijöiden terveys ja turvallisuus eivät saa vaarantua räjähdysvaarallisessa tilassa tai sen ulkopuolella. (576/2003.)

Räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäviä laitteita koskevan asetuksen (1439/2016) tarkoituksena on varmistaa, että räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävät laitteet ja laitteisiin kuuluvat suojausjärjestelmien osat ovat vaatimustenmukaisia, turvallisia ja toimivia käyttäen asetuksen (576/2003) mukaisesti luokitetuissa räjähdysvaarallisissa tiloissa. Asetusta sovelletaan myös turva-, säätö- ja ohjauslaitteisiin, joita käytetään räjähdysvaarallisten tilojen ulkopuolella, mutta jotka ovat välttämättömiä laitteiden ja suojausjärjestelmien toiminnan kannalta. Asetus (1439/2016) ja laki (1139/2016) säätävät vaatimukset laitteille ja järjestelmille, jotta niitä voidaan käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa turvallisesti. ATEX-lain perusteella suunnitelluille laitteille taataan vapaa liikkuvuus EU:n alueella (1139/2016).

2.2.1 Räjähdyksvaaralliset tilat

Räjähdyksvaarallisella tilalla tarkoitetaan tilaa, jossa on mahdollista esiintyä räjähdyskelpoista kaasuseosta niin, että suojaustoimenpiteet työntekijän turvallisuuden takaamiseksi ovat tarpeellisia. Räjähdyksvaaralliset tilat jaetaan kuuteen eri tilaluokkaan, joissa kolmessa räjähdyskelpoisessa ilmaseoksessa reagoivana aineena toimii kaasu, höyry tai sumu. Kolmessa tilaluokassa reagoivana aineena toimii ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos. Suojaustoimenpiteiden laajuus voidaan määrittää näiden tilaluokkien avulla. Tilaluokka 0 vaatii suurimmat toimenpiteet ja tilaluokka 2 vähiten toimenpiteitä. Taulukossa 2.1 on esitetty asetuksen (576/2003) mukaisesti tilaluokat ja niiden määritelmät. Tilaluokat määritetään aina erikseen Ex-tiloissa. Räjähdyksvaarallisten tilojen luokittelu esitetään räjähdysvaarallisuussuojasasiakirjassa, jossa esitetään myös räjähdysvaarallisuustoimenpiteet.

Taulukko 2.1. Räjähdyksvaarallisten tilojen tilaluokat (576/2003).

Tilaluokka	
0	Tila, jossa ilman ja kaasun, höyryn tai sumun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.
1	Tila, jossa ilman ja kaasun, höyryn tai sumun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos todennäköisesti esiintyy normaalitoiminnassa satunnaisesti.
2	Tila, jossa ilman ja kaasun, höyryn tai sumun muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalitoiminnassa on epätodennäköistä ja se kestää esiintyessään vain lyhyen ajan.
20	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.
21	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos todennäköisesti esiintyy normaalitoiminnassa satunnaisesti.
22	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalitoiminnassa on epätodennäköistä ja se kestää esiintyessään vain lyhyen ajan.

2.2.2 Ex-laitteet

Ex-laitteet ovat ATEX-olosuhdedirektiivin mukaisesti luokiteltuihin tiloihin tai tilojen yhteyteen käytettäväksi tarkoitettuja laitteita, laitteista rakennettuja laitekoonpanoja, suojausjärjestelmiä sekä turva-, säätö- ja ohjauslaitteita, joita käytetään

suojausjärjestelmien toimintaan. EX-laitteiden vaatimukset esitetään laissa 1139/2016 ja asetuksessa 1439/2016. Ex-laitteisiin voidaan lukea esimerkiksi sähkölaitteet ja –komponentit, pumput, vaihteistot, pneumaattiset laitteet, trukit, polttomoottorit ja mekaaniset laitteet. Ex-laitteiden tulee täyttää määritellyt terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Laitevaatimuksia ovat muun muassa turvallisuusvaatimukset, vaatimustenmukaisuuden arviointi, vaatimustenmukaisuusvakuutus, CE- ja Ex-merkintä ja laiteryhmä ja –luokkaa kuvaava merkintä. (Tukes 2015.)

Ex-laitteet jaetaan ryhmiin I ja II. Ryhmään I kuuluvat laitteet, joita käytetään kaivoksissa ja kaivosten maanpäällisissä osissa, joissa räjähdysvaara perustuu kaivoskaasuun ja –pölyyn. Ryhmän I laitteet jaetaan kahteen laiteluokkaan M1 ja M2, joka määräytyy halutun turvallisuustason mukaan. Ryhmään II kuuluvat muut laitteet, jotka eivät kuulu ryhmään I. Ryhmän II laitteet jaetaan laiteluokkiin 1, 2 ja 3 vaaditun turvallisuustason mukaan. (1439/2016)

Eri laiteluokkien vaatimukset eroavat toisistaan halutun turvallisuustason mukaisesti. Laiteluokan 1 laitteet on suunniteltava niin, että syttymislähteet eivät pääse syttymään edes laitteiden harvinaisten häiriöiden aikana. Suojaustaso pitää varmistaa vähintään toisella itsenäisellä suojakeinolla. Laiteluokan 2 laitteet on suojattava niin, että prosessin normaalin toiminnan aikana syttymislähteet eivät voi syttyä. Laiteluokan 2 laitteet on suunniteltava niin, että reagoiva aine eivät pääse kosketuksiin laitteista johtuvien syttymislähteiden kanssa myös usein toistuvissa häiriötilanteissa tai toimintahäiriöissä. Laiteluokan 3 laitteet on suunniteltava niin, että prosessin normaalin toiminnan aikana laitteista johtuvat syttymislähteet vältetään. Taulukossa 2.2 on esitetty laiteluokkien jaottelu. (2014/34/EU.)

Taulukko 2.2 *Laiteluokkien jaottelu*

M1 Laiteluokka 1	Erittäin korkea turvallisuustaso
M2 Laiteluokka 2	Korkea turvallisuustaso
Laiteluokka 3	Normaali turvallisuustaso

Lakia räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettujen laitteiden ja suojausjärjestelmien vaatimustenmukaisuudesta (1139/2016) ei kuitenkaan sovelleta muutamiin tapauksiin, joihin sovelletaan omia lakeja ja säädöksiä. Näihin sovelluksiin kuuluvat:

- terveydenhuollon laitteet, joihin sovelletaan omaa lakia
- laitteet, kun räjähdysvaara perustuu yksinomaan räjähtäviin tai epästabiileihin aineisiin

- kotitalouslaitteet, joissa räjähdysvaarallinen tila muodostuu harvoin satunnaisen kaasuvuodon johdosta
- henkilönsuojaimet, joihin sovelletaan omaa lakia
- valtamerialukset, liikkuvat avomeriyksiköt ja niihin liittyvät laitteet
- laitteet henkilö- ja tavarakuljetuksiin yleisellä tiellä, rautatiellä ilmassa tai vesillä
- sotilaallisiin tarkoituksiin käytettävät laitteet. (1139/2016.)

Laitteistojen, työvälineiden, tarvikkeiden ja suojausjärjestelmien tulee olla räjähdysuojasiasiakirjassa todettu turvalliseksi käyttää räjähdyskelpoisessa ilmaseoksessa. Räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävät laitteet pitää todeta räjähdysuojasiasiakirjassa (2.2.5) turvallisiksi käyttää kyseisessä tilassa.

Räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokat määrittävät laitteet, joita saa käyttää kyseisen tilaluokan alueella, jollei räjähdysuojasiasiakirjassa muuta todeta (576/2003). Taulukossa 2.3 on esitetty tilaluokat ja minkä laiteluokituksen laitteita kyseisellä tilaluokitellulla alueella saa käyttää.

Taulukko 2.3. *Oikean laiteluokan valinta räjähdysvaaralliseen tilaan.*

Tilaluokka	Laiteluokka
0	1G
1	1G tai 2G
2	1G, 2G tai 3G
20	1D
21	1D tai 2D
22	1D, 2D tai 3D

2.2.3 Räjähdyksen ennaltaehkäisy

Paras tapa kaasupilviräjähdyksen ennaltaehkäisyyn on vähentää tai estää mahdollisten vapautuvien räjähdysvaarallisten kaasujen määrää. Toiseksi vahingossa vuotaneet kaasut tai tarkoituksellisesti vapautuneet kaasut on johdettava turvalliseen paikkaan tai laimennettava, esimerkiksi ilmastoinnin avulla, tai kaasut on tehtävä muutoin vaarattomiksi. Ilman kanssa sekoittunut reagoiva kaasu voi syttyä vain, kun kaasun pitoisuus on kaasulle ominaisten raja-arvojen välissä. Mahdollisuuksien mukaan olisi turvallista pysyä kaasun pitoisuuksissa näiden räjähdysrajojen ulkopuolella. Kaasupitoisuuksia voidaan vaarallisissa tiloissa valvoa esimerkiksi kaasuilmaisimien avulla. Räjähdyskelpoisen ilmaseoksen käsittely pitää aina tarkastella vaarallisimman aineen mukaan, jos seos sisältää useita erityyppisiä palavia kaasuja.

Mahdollisesti muodostuvat kaasupilvet tulee johtaa turvalliseen paikkaan niin, että kaasu pääsee kosketuksiin erilaisiin syttymislähteisiin mahdollisimman vähän. Syttymislähteinä voi olla esimerkiksi laitteistot, työvälineet, suojausvälineet ja työvaatteet. Näistä kaikista voi kaasupilvi saada tarvittavan syttymisenergian sähköpurkauksen muodossa. Työkoneet ja laitteistot voivat myös kuumentua tarpeeksi,

jolloin kaasu voi paikallisesti saavuttaa itsesyttymislämpötilan aiheuttaen räjähdysen. Lisäksi syttymislähteenä voi olla muun muassa avoliekki, ionisoiva säteily, ultraääni, adiabaattinen puristus, paineaalto, virtaavat kaasut tai kemialliset reaktiot (Tukes 2015.)

Laitteiden virhekytkennät on estettävä sopivin keinoin. Työnantajan on myös varmistettava, että työntekijöiden käytettävissä olevat työvälineet on valittu, rakennettu, koottu, asennettu ja huollettu niin, että räjähdysen vaara on mahdollisimman vähäinen (576/2003, liite 1.) Laitteet ja suojajärjestelmät, jotka ylläpitävät turvallista työskentelyä räjähdysvaarallisessa tilassa, tulee voida pitää käynnissä muun tilan virtakatkoksesta huolimatta. Lisäksi työntekijöiden kouluttaminen ja muut organisatoriset keinot ehkäisevät räjähdysä.

Räjähdysvaarallisia tiloja sisältävä työpaikka on tarkastettava räjähdysturvallisuuden varmistamiseksi ennen kuin työpaikka voidaan ottaa käyttöön. Tarkastuksen voi suorittaa ammatillisen kokemuksen omaava henkilö tai henkilö, joka on muutoin pätevä arvioimaan räjähdysvaaraa ja sen torjuntaa.

2.2.4 Räjähdysen vaikutusten vähentäminen

Suunnittelulla voidaan vähentää räjähdysen haitallisia vaikutuksia. Räjähdyspaineen kevennyslaitteiden avulla voidaan räjähdysessä syntyvä liekki purkaa suojattavasta tilasta ulos. Purkuaukosta leviävä liekki voi aiheuttaa palovammoja henkilökunnalle ja sytyttää uusia tulipaloja suojattavan tilan ulkopuolella. Kevennyslaite tulee suunnata siten, että räjähdysessä reagoineet, reagoivat ja reagoimattomat purkausainekset suunnataan niin, etteivät ne vahingoita muita prosessilaitteita tai alueella olevia ihmisiä.

Kevennysaukon lävitse saattaa tulla tilassa ollutta reagoimatonta kaasua, joka voi syttyä tilan ulkopuolella kaasun kohdatessa sopivan syttymislähteen, aiheuttaen näin uuden räjähdysen tilan ulkopuolella. Purkuaukon ympäristöön ei tulisi näin ollen sijoittaa mitään syttymislähteeksi kelpaavaa.

Kevennysaukon tehtävä on purkaa räjähdysessä syntynyttä ylipainetta ulos suojattavasta tilasta. Aukosta purkautuva paineaalto ja liekki aiheuttavat paineen nousua myös suojattavan tilan ulkopuolella. Kevennysaukon suuntaus pitää siksi ottaa huomioon myös paineen nousun kannalta kevennysaukon ulkopuolella. Kevennysaukkoa ei pidä suunnata esimerkiksi suurien ikkunoiden läheisyyteen ikkunoiden rikkoutumisen välttämiseksi. Räjähdysen purkul liekki pyritään suuntaamaan turvallisesti. Kevennysaukosta tulevien purkausainesten kontrolloituun suuntaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi suuntauslevyjä, jotka asennetaan kevennysaukon eteen riittävälle etäisyydelle. Suuntauslevyllä saadaan myös lyhennettyä liekin pituutta purkaussuunnassa. (SFS-EN 14994.)

Räjähdyksen purkuliekki voidaan myös tukahduttaa tähän sopivilla laitteilla suojattavan kohteen sisällä. Räjähdyistä tukahduttavia laitteita voidaan käyttää esimerkiksi ympäristössä, jonka läheisyyteen purkuliekki ei saa levittyä.

Räjähdyksen vaikutuksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon myös suojattavan tilan tai kotelon perustusten kestäminen. Räjähdyksipaineen kevennysluukun läpi purkautuvalla kaasulla on liikemäärä, jolle kohdistuu samansuuruinen, mutta vastakkaisuuntainen voima eli rekyyli. Suojattavan tilan kevennysluukun vastakkaispuoleiset rakenteet joutuvat ottamaan rekyylivoiman vastaan. Jos tilassa käytetään useita kevennyslaitteita voi olla järkevää sijoittaa kevennyslaitteet vastakkaisille puolille tilaa, jolloin purkausten aiheuttamat vastakkaiset voimat rasittavat tilan rakenteita vähemmän.

2.2.5 Räjähdyssuojausasiakirja

Räjähdyssuojausasiakirjassa arvioidaan räjähdyskelpoisten ilmaseosten ja räjähdysvaaran aiheuttamia riskejä. Suomen laki vaatii, että toiminnanharjoittajan on huolehdittava siitä, että räjähdysuojausasiakirja laaditaan (2005/390, 44§). Räjähdyssuojausasiakirjassa on erityisesti osoitettava:

- räjähdysvaaran arviointi ja määrittely
- toimenpiteet räjähdysvaaran selvittämiseksi, estämiseksi ja suojautumiseksi
- alueet tilassa, jotka on luokiteltu räjähdysvaarallisiksi
- minkä laiteluokan laitteita tilassa voi käyttää
- että turvallisuus otetaan huomioon työtilan suunnittelussa, työvälineiden ja varustuslaitteiden valinnassa, käytössä ja huollossa
- että työvälineitä käytetään turvallisesti.

Räjähdyssuojausasiakirjassa esitetään tulokset ja tekniset suojaustoimenpiteet, jotka koskevat räjähdysvaarallisen tilan vaaran arviointia. Asiakirjassa esitetään tilassa työskentelevien työntekijöiden määrä ja henkilöt, jotka ovat vastuussa tilojen toiminnasta. Asiakirjassa selvitetään organisaatio tai henkilöt, jotka vastaavat turvallisuustoimenpiteiden toteuttamisesta ja räjähdysuojausasiakirjan päivittämisestä. Asiakirjassa esitetään räjähdysvaaran kannalta olennaiset tiedot tilojen toiminnasta, siivouksesta ja ilmanvaihdosta. Asiakirjassa kuvataan tilanteet ja olosuhteet, joissa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia saattaa esiintyä ja lisäksi aineet, jotka räjähdysten voivat aiheuttaa. Räjähdyksivaarallisen ilmaseoksen aiheuttamat vaarat tulee kuvata myös erilaisissa tilanteissa kuten siivouksen, muutostilanteiden ja prosessien ylös- ja alasajon yhteydessä. Asiakirjassa esitetään räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi hyväksytyt laitteet ja työvälineet. Lisäksi esitetään luettelo mahdollisena syytyslähteenä toimivista laitteista ja työvälineistä. Asiakirjassa selvitetään toimenpiteet räjähdykseltä suojautumiseen. Toimenpiteisiin kuuluu muun muassa vaarallisten ilmaseosten välttäminen ennakolta, syytyslähteiden tunnistaminen ja suojaus, työohjeiden päivittäminen, työntekijöiden koulutus, työvälineiden kunnossapito ja huolto,

suojavaatetuksen käyttö sekä räjähdysvaarallisten tilojen merkintä. Lisäksi asiakirjassa tulee esittää pohjapiirustus, josta selviää tilan poistumistiet. (Tukes 2015.)

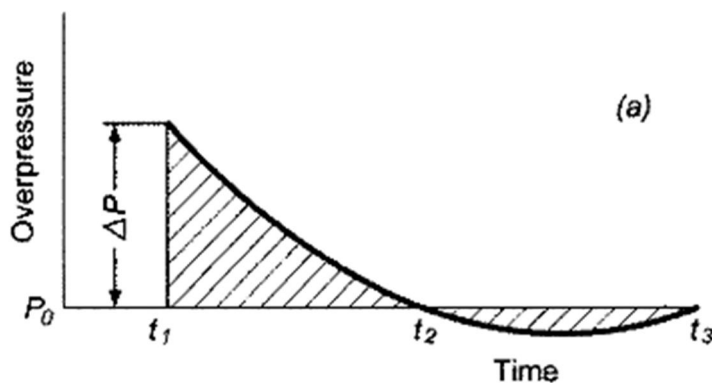
Räjähdysuojausasiakirja on laadittava ennen kuin varsinainen työskentely työtilassa aloitetaan. Asiakirja on tarkistettava aina, jos työskentelytilaa, työvälineitä tai työtapaa muutetaan olennaisesti.

3. KAASUPILVIRÄJÄHDYKSEN TEORIAA

Tässä luvussa esitellään kaasupilviräjähdyksen taustaa ja kaasupilviräjähdyttä hallitsevat yhtälöt. Esitetään räjähdysaaltoa hallitsevat jatkuvuus-, liikemäärä- ja energiayhtälöt. Jokaiselle palamisen yhteydessä reagoivalle komponentille muodostetaan massataseyhtälö. Komponenttien taseyhtälöissä huomioidaan kemiallinen energia, joka vapautuu räjähdyksen yhteydessä.

3.1 Detonaatio

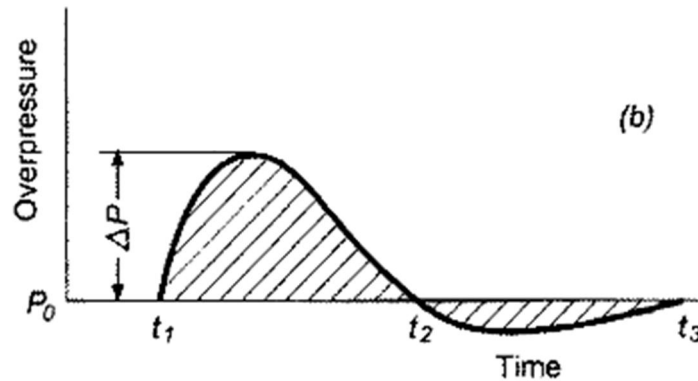
Detonaatio on äkillinen räjähdys, jossa räjähdyksessä syntyvä liekkirintama leviää ylisoonisella nopeudella ympäröivään reagoimattomaan aineeseen. Kuvassa 3.1 on esitetty paineen kehitys ajan funktiona paikallisesti (Casal 2008, s. 122). Detonaatiolle on ominaista, että paineen arvo nousee huippuunsa välittömästi kemiallisten reaktioiden alettua.



Kuva 3.1 Detonaatioaallon paine-aika -kuvaaja (Casal 2008).

3.2 Humahdus/Deflagraatio

Räjähdyttä kutsutaan deflagraatioksi, jos räjähdys ei synny äkillisesti vaan se kehittyy palamalla. Deflagraatioaalolle ominaista on, että kemialliset reaktiot tapahtuvat huomattavasti hitaammin kuin detonaatioaalossa. Deflagraatiossa syntyvä liekkirintama levittyy ympäristöön alisoonisella nopeudella saaden tarvittavan energian palamiseen ympäröivästä palamattomasta kaasusta. Kuvassa 3.2 on esitetty deflagraatioaallon synnyttämä paineen nousu ajan funktiona paikallisesti. Kaasupilviräjähdykset tapahtuvat käytännössä aina humahduksina.



Kuva 3.2. Deflagraatioaallon paine-aika -kuvaaja (Casal 2008).

3.3 Virtausta hallitsevat yhtälöt

Palamista hallitsevat yhtälöt voidaan esittää säilymisyhtälöiden avulla. Säilymisyhtälöiden avulla voidaan laskea esimerkiksi kuinka paine, lämpötila tai nopeus muuttuu tarkasteltavassa alueessa. Yhtälöiden analyyttinen ratkaisu ei kuitenkaan ole mahdollista, joten ne joudutaan ratkaisemaan numeerisesti. Alla esitetään hallitsevat yhtälöt yleisessä muodossa jatkuvuudelle, liikemäärälle, energian säilymiselle ja komponenttien massataseen säilymiselle.

Yhtälö (3.1) kuvaa massan häviämättömyyttä. Massaa ei voi hävitä eikä, sitä voi syntyä tyhjästä, mutta se voi muuttua muotoaan. Systemin massa säilyy vakiona.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (3.1)$$

jossa ρ on tiheys, t on aika, u on nopeus ja x on etäisyys (Versteeg & Malasekera 2007, s. 11). Liikemäärän säilyminen voidaan kuvata Navier-Stokesin yhtälöillä. Yleisessä muodossa reaktiivisille virtauksille yhtälöt voidaan kirjoittaa yhtälön (3.2) mukaan (Poinson & Veynante 2005, s. 13).

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i}, \quad (3.2)$$

$$\text{jossa leikkausjännitustensori } \tau_{ij} = -\frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

Jossa P on paine, δ_{ij} on Kroneckerin delta ja μ on dynaaminen viskositeetti. Kroneckerin delta δ_{ij} saa arvon 1, jos $i = j$, muuten $\delta_{ij} = 0$. Y on tarkasteltavan komponentin massaosuus ja f kuvaa tilavuusvoimia määritettyyn suuntaan. Palamisen yhteydessä palava aine, esimerkiksi kaasuseos, reagoi hapen kanssa, jolloin reaktion yhteydessä

vapautuu lämpöenergiaa ja syntyy reaktiotuotteita. Massataseyhtälöillä voidaan ratkaista eri komponenttien tase reaktion yhteydessä

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho(u_i + V_{k,i})Y_k) = \dot{\omega}_k, \quad (3.3)$$

jossa $\dot{\omega}$ on reaktionopeus kontrollitilavuudessa (Poinson & Veynante 2005, s. 13). $V_{k,i}$ on diffuusiosta aiheutuva nopeus.

Energiayhtälö kuvaa sitä, että energia muuttuu muotoaan eikä energiaa voi hävitä. Energian muutos fluidissa saadaan, kun summataan työ joka tehdään fluidiin, lämpöenergian tuonnilla.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{DP}{Dt} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} V_{k,i}, \quad (3.4)$$

$$jossa q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i}.$$

Yhtälössä (3.4) h on seoksen entalpia, P on paine, k on lämmönjohtavuus, T on lämpötila ja \dot{Q} on lähdetermi, joka sisältää kontrollitilavuuden ulkopuolelta tai sisäpuolelta tulevan energian (Poinson & Veynante 2005, s. 17).

Yleiset yhtälöt voidaan yksinkertaistaa kaasupilvipilviräjähdyksen tapauksessa, kun oletetaan, että virtauksen osuus jätetään huomioitta räjähdysyhteydessä. Yleististä yhtälöistä jäävät siis kitkatermi pois. Kaasupilviräjähdyksen yhteydessä hallitsevat yhtälöt voidaan esittää yhtälöiden (3.5)–(3.8) mukaan (Strehlow 1984, s. 123).

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \bar{V}) = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = -\nabla P \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = -P(\nabla \cdot \bar{V}) \quad (3.7)$$

$$\rho \frac{DY_i}{Dt} = \omega_i \quad (3.8)$$

$$, jossa \omega_i = \rho M_i \sum_{i=1}^p v_{ij} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \text{ ja } \sum_{i=1}^s \frac{DY_i}{Dt} = 0,$$

jossa e on sisäenergia. Tarkastelemalla ajasta riippumatonta, yksiulotteista ja kitkatonta tapausta voidaan hallitsevat yhtälöt esittää yksinkertaisemmassa muodossa, kaavojen

(3.9)-(3.11) mukaisesti. Yhtälöissä indeksi 1 esittää tilaa ennen palamisaaltoa ja indeksi 2 tilaa palamisaallon jälkeen. Kuvassa 3.3 on esitetty reaktiorintaman eteneminen ajasta riippumattomassa tapauksessa.

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (3.9)$$

$$P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2 \quad (3.10)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \quad (3.11)$$

Liikemääräyhtälö (3.10) voidaan esittää toisessa muodossa kertomalla yhtälön molemmat puolet ominaistilavuuksien summalla.

$$(P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) = u_1^2 - u_2^2 + \frac{\rho_1}{\rho_2} u_1^2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} u_2^2 \quad (3.12)$$

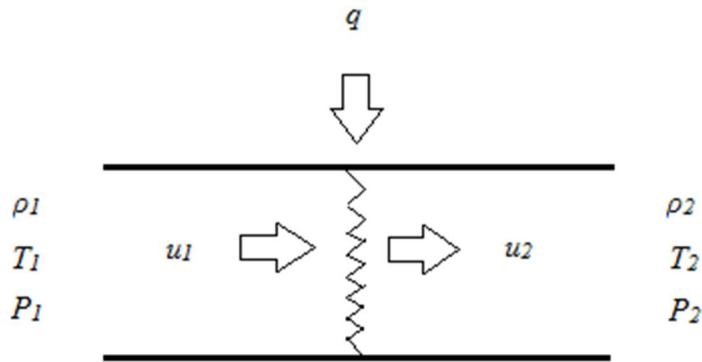
Käyttämällä massayhtälöä voidaan liikemääräyhtälö yksinkertaistaa muotoon (3.13).

$$(P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) = u_1^2 - u_2^2 \quad (3.13)$$

Sijoittamalla saatu liikemääräyhtälö energiayhtälöön huomataan, että energiayhtälö voidaan esittää muodossa (3.14).

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_1 + v_2), \quad (3.14)$$

jossa v_i on ominaistilavuus eli $1/\rho_i$. Yhtälöä (3.14) kutsutaan Rankine-Hugoniot-yhtälöksi ajasta riippumattomalle tapaukselle. Yhtälö sitoo massa-, liikemäärä- ja energiayhtälön toisiinsa. Rankine-Hugoniot-yhtälöllä voidaan määrittää kaasun tila ennen räjähdysrintamaa ja räjähdysrintaman jälkeen (Strehlow 1984, s. 128.)



Kuva 3.3. Deflagraatio- tai detonaatioaallon eteneminen väliaineessa.

Kaasu oletetaan ideaalikaasuksi, jolloin kaasun tilayhtälö on yhtälön (3.15) mukainen. Lisäksi oletetaan, että liekkirintamassa syntyvä lämpö lisätään virtaukseen, jolloin entalpia ennen liekkirintamaa ja liekkirintaman jälkeen voidaan esittää alla olevien yhtälöiden mukaisesti. Liekkirintaman jälkeisessä tilassa, entalpien yhtälössä, q :n positiivinen arvo kuvaa lämmön tuontia virtaukseen.

$$\frac{P_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2}{T_2 \rho_2} = \frac{R_u}{M_i} \quad (3.15)$$

$$h_1 = c_p T_1$$

$$h_2 = c_p T_2 - q,$$

jossa R_u on yleinen kaasuvakio ja M on moolimassa. Ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa ideaalikaasulle on määritelty kaavan (3.16) mukaisesti. Määritetään lämpökapasiteeteille suhde γ

$$c_v = c_p - \frac{R_u}{M_i}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (3.16)$$

Nyt ominaislämpö vakioaineessa voidaan muokata muotoon

$$c_p = \frac{c_p}{c_p - c_v} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}.$$

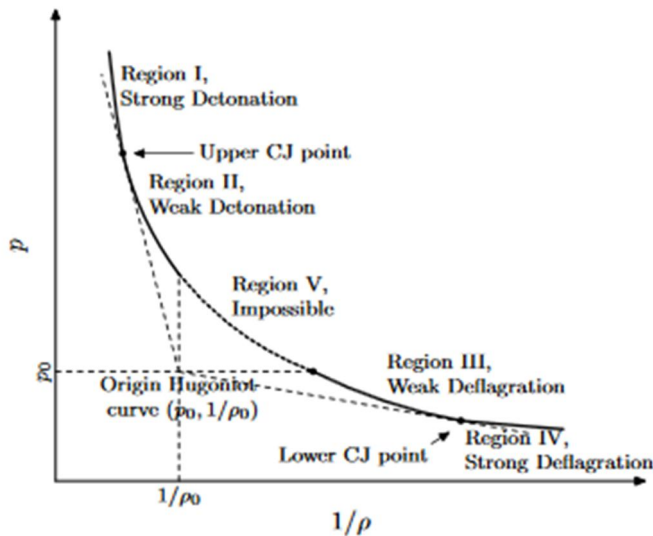
Sijoittamalla entalpiat ja ominaislämpö energiayhtälöön, ja käyttämällä ideaalikaasun tilanyhtälöä, saadaan energiayhtälö muotoon

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_2 v_2 - P_1 v_1) - q = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_1 + v_2). \quad (3.17)$$

Sijoittamalla jatkuvuusyhtälöstä (3.9) ratkaistu nopeus u_2 , liikemäärän yhtälöön (3.10) saadaan liikemääräyhtälö muotoon

$$\rho_1^2 u_1^2 = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}}. \quad (3.18)$$

Yhtälöä (3.18) kutsutaan Rayleighkin suoraksi. Rayleighkin suora määrittää reunaehdot detonaatio- ja deflagraatioaallon muodostumiselle. Kuvassa 3.4 on esitetty Hugoniotin diagrammi. Kuvasta nähdään, että detonaatioaallon yli paine kasvaa ja ominaistilavuus pienenee. Deflagraatioaallon yli paine taas pienenee, mutta ominaistilavuus kasvaa. Rayleighin yhtälöstä nähdään, että detonaation ja deflagraation välillä on alue, joka on mahdoton saavuttaa. Yhtälössä (3.18) osoittajassa $P_2 > P_1$ ja nimittäjässä $1/\rho_1 < 1/\rho_2$, jolloin yhtälön oikeasta puolesta tulee negatiivinen arvo. Jos yhtälön oikealta puolelta tulee negatiivinen arvo, niin nopeuden u_1 tulisi saada imaginaariarvo, mikä ei ole mahdollista.



Kuva 3.4. Hugoniot-diagrammi (Dahoe)

Hugoniotin diagrammiin voidaan soveltaa kokeellisia arvoja, joiden avulla saadaan detonaatio- tai deflagraatioaallolle määritettyä Machin luku ilma-polttoaineseokselle. Taulukossa 3.1 on esitetty kokeellisia arvoja stoikiometrisessä tilassa olevalle seokselle. Machin luku ja paineen arvo saadaan sijoittamalla taulukon 3.1 arvot yhtälöihin (3.19) ja (3.20) (Bartok & Sarofim (1991), s.370.)

Taulukko 3.1. Kokeellisia arvoja Hugoniotin diagrammiin.

Kaasu	Kaava	q/P_1V_1	γ
Metaani	CH ₄	39,27	1,202
Propaani	C ₃ H ₈	47,42	1,208
Vety	H ₂	33,89	1,173

$$M_2 = \sqrt{\left[\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma} \frac{q}{P_1V_1} + 1 \right] \pm \sqrt{\left[\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma} \frac{q}{P_1V_1} + 1 \right]^2 - 1}}, \quad (3.19)$$

jossa positiivinen merkki viittaa kuvan 3.4 Chapman-Jouguetin Machin lukuun detonaatiolle ja negatiivinen merkki viittaa Chapman-Jouguetin Machin lukuun deflagraatiolle. Paine välittömästi paineaallon jälkeen voidaan laskea muokkaamalla liikemääräyhtälöä (3.10) ja olettamalla, että reagoineet tuotteet liikkuvat nopeudella $Ma_1 = 1$, jolloin

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1 + \gamma M_2^2}{\gamma + 1}. \quad (3.20)$$

Chapman-Jouguet-yhtälöiden on todettu vastaavan detonaatioaallon osalta hyvin kokeellisia tuloksia. Deflagraatioaalto kulkeutuu hitaammin eteenpäin syttyksen jälkeen kuin detonaatioaalto, jolloin reagoivat aineet deflagraatioaallon edessä vaikuttavat palaneisiin aineisiin. Deflagraatioaallon hitaamman luonteen vuoksi sille tulee tehdä tarkempi tarkastelu paineen muutoksen osalta (Lee 2008). Toisaalta paineen arvo pysyy lähes vakiona vapaasti etenevän deflagraatioaallon jälkeen, joten detonaatioaallon tarkastelu on tärkeämpää paineenmuutoksen osalta.

3.4 Paineaallon muodostuminen suljetussa tilassa

Tarkastellaan paineenousua suljetussa pallomaisessa tilassa, jossa syttyminen tapahtuu keskeisesti. Oletetaan, että laminaari liekki lähtee etenemään syttymislähteestä pallomaisesti kohti palotilan seinää. Kaasun massan m säilymiselle voidaan kirjoittaa

$$m_0 = m_u + m_b \quad (3.21)$$

$$\frac{dm_u}{dt} = -\frac{dm_b}{dt}, \quad (3.22)$$

joissa indeksi 0 viittaa alkutilaan ennen reaktiota, u viittaa vielä reagoimattomiin kaasuihin reaktioalueen ulkopuolella ja b viittaa reagoineisiin kaasuihin. Massan jatkuvuus voidaan myös esittää palamisnopeuden S_u avulla (Bradley & Mitcheson, 1976.)

$$\frac{dm_u}{dt} = -4\pi r_b^2 \rho_u S_u. \quad (3.23)$$

Oletetaan, että reagoimaton kaasu puristuu isentrooppisesti, jolloin

$$P\rho_u^{-\gamma_u} = \text{vakio},$$

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (3.24)$$

Suljetun tilan räjähdysten mallinnuksessa Bradley ja Mitcheson (1976) olettivat, että paineen nousu reaktion yhteydessä on verrannollinen reagoineen massan suhteesta kokonaisuudessaan tarkastellussa alueessa

$$\frac{P - P_0}{P_e - P_0} = \frac{m_b}{m_o} = n, \quad (3.25)$$

jossa P on räjähdysaallon paine ajan hetkellä t ja m_o on kokonaisuudessaan tarkasteltavassa alueessa. Olettamalla, että paineenousu on suoraan verrannollinen reagoineeseen massaan, Bradley ja Mitcheson (1976) esittivät mallin paineen nousulle lieriömäisen tilan sisällä ajan funktiona:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u\rho_u}{R\rho_0} (P_e - P_0) \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma_u}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0}\right]^{2/3}. \quad (3.26)$$

Luijten *et al.* (2009) kehittivät Bradley ja Mitchesonin esittämää mallia tekemällä oletuksen, että paineenousu ei ole suoraan verrannollinen reagoivan kaasun massaan. Luijten *et al.* esittivät paineen ja reagoineen massan välille suhteen, joka ottaa huomioon reagoineen ja vielä reagoimattoman kaasun lämpökapasiteettien suhteen

$$\frac{P - P_0 \left[\left(\frac{\gamma_b - 1}{\gamma_u - 1}\right) + \frac{T_u}{T_i} \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_u - 1}\right) \right]}{P_e - P_0 \left[\left(\frac{\gamma_b - 1}{\gamma_u - 1}\right) + \frac{T_u}{T_i} \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_u - 1}\right) \right]} = n. \quad (3.27)$$

Olettamalla lämpökapasiteettien suhteet samoiksi ($\gamma_u = \gamma_b$) palautuu suhde n lineaariseksi suhteeksi, yhtälön (3.25) mukaisesti. Luijten *et al.* (2009) oletuksen mukaan palaneen kaasun suhde, n , voidaan kirjoittaa paineen avulla

$$n = \frac{P - P_0 f(P)}{P_e - P_0 f(P)}, \quad (3.28)$$

josta $f(P)$ saadaan olettamalla adiabaattinen puristus

$$f(P) = \left(\frac{\gamma_b - 1}{\gamma_u - 1}\right) + \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_u - 1}\right) \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{\gamma_u - 1}{\gamma_u}}. \quad (3.29)$$

Derivoidaan n ajan suhteen, jolloin

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1 - P_0 f'(P)}{P_e - P_0 f(P)} - \frac{P_0 f'(P) [P - P_0 f(P)]}{[P_e - P_0 f(P)]^2}, \quad (3.30)$$

jossa

$$P_0 f'(P) = \left(\frac{\gamma_u - \gamma_b}{\gamma_u}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{-1}{\gamma_u}}. \quad (3.31)$$

Paineelle voidaan johtaa yhtälö (3.32), samalla tavalla kuin Bradley ja Mitchesonin johtama yhtälö (3.26) on johdettu. Yhtälössä kuitenkin paineen ja reagoivan kaasun suhde n ei ole lineaarinen vaan yhtälön (3.28) mukainen

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u}{R} \left(\frac{dn}{dp}\right)^{-1} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma_u}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma_u}} (1 - n)\right]^{2/3}. \quad (3.32)$$

Sijoittamalla yhtälöt (3.28)-(3.31) yhtälöön (3.32) saadaan tavallinen differentiaaliyhtälö, joka voidaan ratkaista esimerkiksi Mathcad-laskentaohjelmistolla.

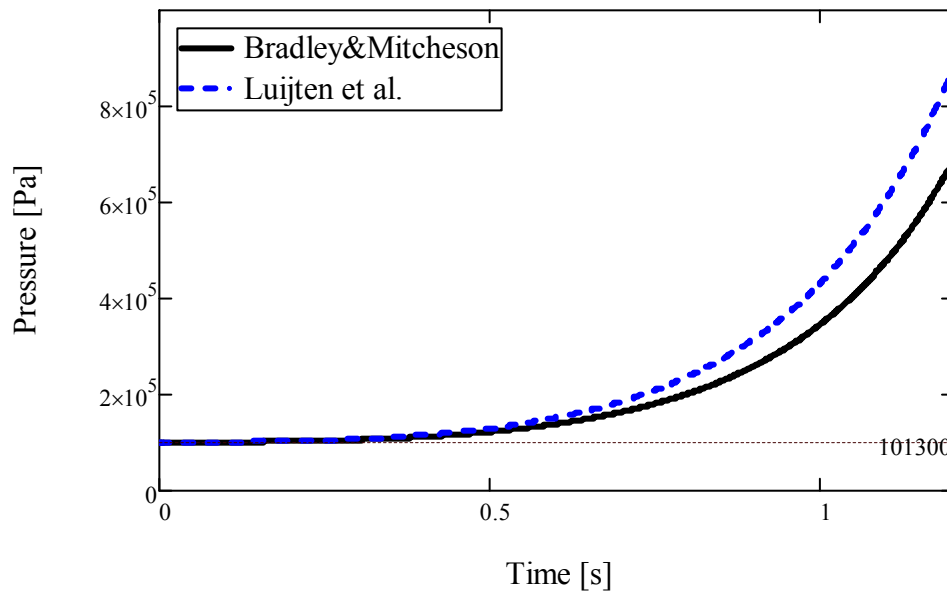
Yhtälöiden (3.26) ja (3.32) mukainen paineenkehitys olettaa, että palamisnopeus S_u on vakio. Todellisuudessa palamisnopeus kasvaa paineen ja lämpötilan noustessa. Todelliselle tilanteelle, liekin lähestyessä palotilan pintaa, palamisnopeudelle pitäisi olettaa jokin kokeellinen korrelaatio, jotta liekin palamisnopeuden muutoksen vaikutus paineen nousuun saataisiin otettua huomioon. Metghalchin & Keckin (1980) -korrelaation avulla voidaan palamisnopeuden nousu ottaa huomioon.

$$S = S_0 \left(\frac{T_i}{T_0}\right)^\alpha \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta, \quad (3.33)$$

jossa indeksi 0 viittaa tilaan, jossa laminaari palamisnopeus on mitattu ja i viittaa lähtötilanteeseen. Olettamalla isentrooppinen puristuvuus palamisen aikana (3.24) voidaan palamisnopeutta suljetun tilan kaaturäjähdyksessä kuvata yhtälön (3.34) mukaisesti.

$$S = S_u \left(\frac{P}{P_0}\right)^\epsilon, \quad (3.34)$$

jossa ϵ on 0,30 metaanille ja 0,31 propanille (Molkov et al. 2000). Sijoittamalla yhtälön (3.34) mukainen palamisnopeuden muutos yhtälöihin (3.26) ja (3.32), saadaan kuvan 3.5 mukaiset paine-aika-kuvaajat. Tilanteessa mallinnetaan 2,46 metrin säteinen pallo, jossa stoikiometrinen metaani-ilmaseos syttyy keskeisesti.



Kuva 3.5. Yhtälöiden (3.32) ja (3.26) mukaiset paine-aika-kuvaajat.

Paineen maksimiarvo saavutetaan noin 1,2 sekunnin kuluttua reaktion alkamisesta. Luijten et al.:n yhtälön mukaisesta käyrästä (3.32) nähdään paineen suurin muutosnopeus dP/dt kuvasta 3.5, derivaatan maksimiarvosta ajan hetkellä 1,2 s. Paineen muutos aikavälillä 0,96–1,2 sekuntia on 1,0–8,82 bar:ia eli dP/dt saa arvon 32,6 bar/s. Tarkemmat arvot ajalle ja paineen arvoille saadaan Mathcad-ohjelmistosta.

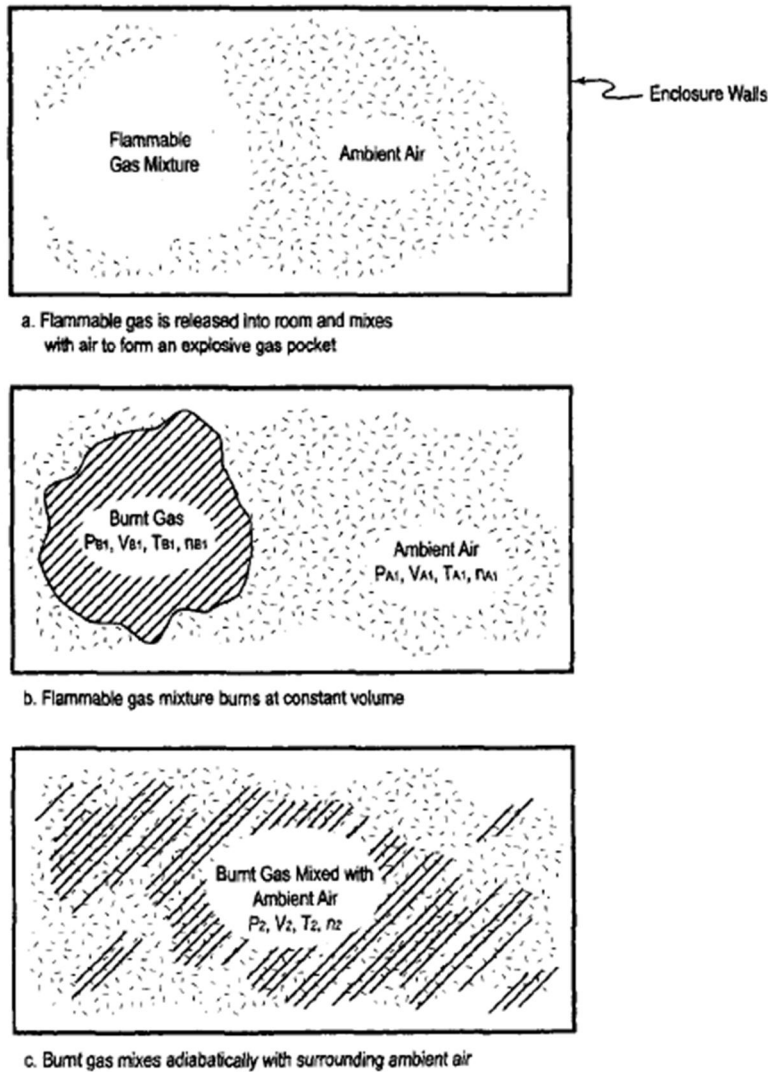
3.5 Osittaisen kaasupilven räjähdyspaineen arviointi suljetussa tilassa

Kaasuräjähdyksiä esiintyy usein tilanteissa, joissa kaasua ei ole tarpeeksi täyttämään koko tarkasteltavaa aluetta. Syttyvä kaasupilvi voi muodostua isoon suljettuun tilaan niin, että pilven pitoisuus on riittävä reaktion alkamiselle, vaikka pilven pitoisuus ei olisi riittävä syttymiselle koko tilassa. Seuraavassa esitetään kaksi mallia, joilla voidaan arvioida räjähdyspaineen nousua tilassa, mihin on muodostunut osittainen kaasupilvi. Mallien avulla voidaan myös arvioida pienintä määrää kaasua, joka tarvitaan, että määrätyn suuruinen räjähdyspaine syntyy.

3.5.1 Adiabaattinen sekoitusräjähdysmalli

Ogle (1999) esitti analyyttisen mallin, jonka avulla pystytään arvioimaan räjähdyspaineen nousua osittain tilan täyttävästä kaasupilvestä. Analyysissä kirjoitetaan energiatase kahden tilan välille, jossa alkutilaksi määritetään tila, tila1, jossa kaasupilvi on palanut vakio-tilavuudessa. Lopullinen tila, tila 2, saavutetaan, kun reagoit

kaasupilvi sekoittuu adiabaattisesti ympäröivän ilman kanssa. Kuvassa 3.6 on esitetty lähtö- ja lopputilanne adiabaattiselle sekoitusräjähdysmallille.



Kuva 3.6. Osittain kaasulla täytetyn tilan räjähdyspaineen mallinnus (Ogle 1999).

Energiatase voidaan kirjoittaa sisäenergioiden avulla

$$\Delta U_A + \Delta U_B = 0, \quad (3.35)$$

jossa ΔU on sisäenergia muutos, kJ/mol. Alaindeksi A viittaa ympäröivään ilmaan ja alaindeksi B reagoineeseen kaasuun. Yhtälö voidaan kirjoittaa lämpötilojen avulla

$$n_{A1}c_v(T_2 - T_{A1}) = -n_{B1}c_v(T_2 - T_{B1}), \quad (3.36)$$

jossa n on moolien lukumäärä, mol. c_v on ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, kJ/mol K. T on absoluuttinen lämpötila, K. Ottamalla huomioon ideaalikaasun tilanyhtälö

(3.15) ja olettamalla adiabaattinen sekoittuminen, voidaan paine räjähdysten jälkeen laskea kaavan (3.37) mukaan. (Jo & Park, 2004.)

$$P = P_0 \left(\frac{V - V_b}{V} + \frac{V_b}{V} \left(\frac{P_E}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\gamma}, \quad (3.37)$$

jossa V on koko tilan tilavuus, P_0 on tilan paine ennen räjähdystä ja P_E on räjähdyspaine, reagoivan kaasun ollessa stoikiometrisessä tilassa ilman kanssa vakiotilavuudessa. V_b viittaa reagoivan aineen tilavuuteen suljetussa tilassa ja se voidaan laskea kaavan (3.38) mukaan. V_b on määritetty reagoivan kaasun tilavuuden V_{RG} suhteena kaasun stoikiometriseen kertoimeen C_{st} .

$$V_b = \frac{V_{RG}}{C_{st}} = \frac{V C_{av}}{C_{st}} \quad (3.38)$$

Jo & Parkin (2004) mukaan menetelmä yliarvioi räjähdyspainetta, koska reagoiva kaasu osallistuu palamisreaktioon kokonaan, mikä ei ole todellisuudessa mahdollista.

3.5.2 Normaalijakautunut räjähdysmalli

Jo & Park (2004) kehittivät parannellun räjähdyspainemallin. He olettivat, että kaasun konsentraatio on normaalijakautunut kaasupilvessä. Jo & Parkin oletuksen mukaan kaasupilvessä ainoastaan ne alueet, joiden konsentraatio on alemman leimahdusrajan yläpuolella ja ylemmän leimahdusrajan alapuolella osallistuvat paineaallon kehitykseen. Seuraavaksi esitetään Jo & Parkin ehdottamaa normaalijakautunutta räjähdysmallia, jolla voidaan arvioida pienintä kaasun määrää, joka tarvitaan synnyttämään tuhoa rakenteissa.

Kaasupilven konsentraation jakauma oletetaan normaalijakautuneeksi

$$C = C_0 e^{-k\bar{x}^2}, \quad (3.39)$$

jossa \bar{x} on dimensioton etäisyys kaasupilven reunasta kaasupilven suurimman konsentraation alueelle, skaalattuna kaasupilven korkeudella. C_0 on suurin konsentraatio kaasupilvessä. Kerroin k riippuu kaasupilven muodostumisen parametreista. Kaasupilven konsentraatio voidaan esittää dimensiottomassa muodossa

$$\bar{C} = e^{-k\bar{x}^2}. \quad (3.40)$$

Kaasupilven keskimääräinen konsentraatio esitetään kaasupilven tilavuuden suhteesta koko tilan tilavuuteen

$$C_{av} = \frac{V_{RG}}{V} = C_0 \int_0^1 \bar{C} d\bar{x}, \quad (3.41)$$

jossa V_{RG} on kaasupilven tilavuus ja C_0 on suurin konsentraatio kohdassa $\bar{x} = 0$. Leimahdusrajojen välissä olevan reagoivan kaasun suhde koko kaasupilven konsentraatioon voidaan arvioida:

$$\omega = \frac{\int_{\bar{x}_{UFL}}^{\bar{x}_{LFL}} \bar{C} d\bar{x}}{\int_0^1 \bar{C} d\bar{x}}. \quad (3.42)$$

Dimensiottomat etäisyydet \bar{x}_{LFL} ja \bar{x}_{UFL} saadaan arvioitua muokkaamalla yhtälöä (3.40).

$$\bar{x}_{LFL} = \text{Re} \left[\sqrt{\frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_{LFL}}\right)}{k}} \right] \quad (3.43)$$

$$\bar{x}_{UFL} = \text{Re} \left[\sqrt{\frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_{UFL}}\right)}{k}} \right], \quad (3.44)$$

jossa Re merkitsee reaaliosaa kompleksiluvusta. Leimahdusrajojen välissä olevan kaasun suhde kaasun kokonaismäärään voidaan nyt arvioida

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\int_{\bar{x}_{UFL}}^{\bar{x}_{LFL}} e^{-k\bar{x}^2} d\bar{x}}{\int_0^1 e^{-k\bar{x}^2} d\bar{x}} \\ &\approx \text{erf} \left\{ \text{Re} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_{UFL}}\right)} \right] \right\} - \text{erf} \left\{ \text{Re} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_{LFL}}\right)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Räjähdyksestä aiheutuva paine voidaan arvioida muokkaamalla adiabaattista sekoitusräjähdysmallia (3.37) muotoon

$$P = P_0 \left(1 - \frac{\omega V_b}{V} + \frac{\omega V_b}{V} \left(\frac{P_E}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right)^\gamma. \quad (3.46)$$

Yhdistämällä yhtälöt (3.38) ja (3.46) saadaan arvio kaasumäärälle, joka minimissään tarvitaan määrätyn suuruisen räjähdyspaineen saavuttamiseksi

$$V_{RG} = \frac{VC_{st}}{\omega} \left[\frac{1 - \left(\frac{P_{max}}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}{1 - \left(\frac{P_E}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}}} \right], \quad (3.47)$$

jossa P_{max} vastaa räjähdyspainetta annetussa tuholuokassa. Yhtälöstä nähdään, että suhteen ω suurin arvo vastaa pienintä määrää räjähtävää kaasua $V_{RG} \cdot \omega_{max}$ saavutetaan, kun kaasupilven suurin konsentraatio saavuttaa ylemmän leimahdusrajan UFL . Tällöin $\bar{x}_{UFL} = 0$ ja muokkaamalla yhtälöä (3.45) saadaan

$$\omega_{max} \approx \text{erf} \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C_{UFL}}{C_{LFL}} \right)} \right] \quad (3.48)$$

Suurin arvo suhteelle ω voidaan arvioida leimahtavan kaasun leimahdusrajojen avulla. Vähimmäismäärä kaasua, joka tarvitaan määritetyn paineisen räjähdys synnyttämiseen, voidaan arvioida kaavojen (3.48) ja (3.47) mukaan.

3.6 Kaasujen syttyvyysominaisuuksia

Teollisuudessa käytetään paljon kaasuja erilaisissa prosesseissa. Aina, kun kaasua pumpataan putkistoja pitkin eteenpäin, voi syntyä kaasuvuoto. Vuotoja voi syntyä esimerkiksi putkien liitoksien tai tiivisteiden kautta. Vuotojen kautta voi syntyä kaasupilviä, jotka syttyessään voivat aiheuttaa räjähdys ja suurta tuhoa. Kun arvioidaan kaasupilven palamisen aiheuttamaa paineen nousua, tulee tuntee kaasun palamisominaisuudet.

Edellä johdetut paineen nousun arviointiin käytetyt yhtälöt tarvitsevat kokeellisia arvoja yhtälöiden ratkaisemiseksi. Esimerkiksi laminaari palamisnopeus, palamisen lämpöarvo ja leimahdusrajat voidaan määrittää kokeellisesti. Leimahdusrajat ovat ominaisia eri kaasuille. Kaasupilvi voi syttyä ainoastaan, kun pilven pitoisuus on leimahdusrajojen välissä. Tarkasteltavan kaasun pitoisuuden laskiessa alemman leimahdusrajan alle ei kaasu enää syty palamaan. Toisaalta, jos kaasun pitoisuus määritetyssä tilassa on suurempi kuin ylempi leimahdusraja, kaasu ei myöskään tällöin pysty syttymään.

Taulukossa 3.2 on esitetty yleisesti käytettyjen kaasujen palamisominaisuuksia. Palamisnopeuden arvot ovat saatu NFPA 68 (2013) -standardista, leimahdusrajat lähteestä Kondo et al. (2006) ja palamisen lämpöarvot lähteestä Casal (2008).

Taulukko 3.2. Yleisesti käytettyjen kaasujen palamisominaisuuksia.

Kaasu	Kaava	Palamis- nopeus (m/s)	Alempi leimahdusra- ja (til.-%)	Ylempi leimahdusraja (til.-%)	Ylempi lämpöarvo (kJ/kg)
Asetyleeni	C ₂ H ₂	1,66	2,5	100,0	49907
Asetoni	C ₃ H ₆ O	0,54	2,6	13,0	31360
Butaani	C ₄ H ₁₀	0,45	1,6	8,4	49510
Etaani	C ₂ H ₆	0,47	3,0	12,5	51912
Metaani	CH ₄	0,40	4,9	15,8	55505
Propaani	C ₃ H ₈	0,46	2,3	9,5	50338
Vety	H ₂	3,12	4,0	75	141900

Taulukossa 3.3 on esitetty eri kaasuille stoikiometrinen konsentraatio, jolla kaasun reagoidessa hapen kanssa kaikki happi kuluu reaktiotuotteiksi. Tällöin saavutetaan paineelle ja lämpötilalle suurimmat teoreettiset arvot. Lasketaan eri kaasuille lämpötilan ja paineen arvot palamisen jälkeen, kun palaminen tapahtuu vakio-tilavuudessa ja adiabaattisesti. Alkuehtoina oletetaan, että kaasuseos on stoikiometrisessä tilassa ja 300 kelvinin lämpötilassa ja ympäristön paine on 1 bar. Lasketaan lopputilanne Gaseq-ohjelmistolla, joka laskee reaktion tasapainotilanteen palamiselle.

Taulukko 3.3 Kaasujen lämpötila ja paine stoikiometrisen palamisen jälkeen.

Kaasu	Kaava	Stoikiometrinen konsentraatio (til.-%)	T_v (K)	P_v (bar)
Asetoni	C ₃ H ₆ O	5,9	2577	9,2
Asetyleeni	C ₂ H ₂	7,72	2915	9,7
Butaani	C ₄ H ₁₀	3,12	2629	9,3
Etaani	C ₂ H ₆	5,64	2622	9,1
Metaani	CH ₄	9,47	2588	8,8
Propaani	C ₃ H ₈	4,02	2630	9,3
Vety	H ₂	29,6	2767	8,0

Taulukosta 3.3 huomataan, että hiilivedyille lämpötilan ja paineen arvot palamisessa ovat hyvin lähellä toisiaan. Taulukkoon 3.3 saatuja paineen maksimiarvoja voidaan käyttää luvun 3. yhtälöiden maksimipaineen arvoina.

Taulukossa 3.4 on esitetty eri kaasuille vähimmäisenergia, joka tarvitaan palamisen saavuttamiseksi. Lisäksi taulukossa on esitetty kaasun itsesyttymislämpötila. Arvot on saatu Bartok & Sarofilm (1991) fossiilisia polttoaineita käsittelevästä kirjasta. Itsesyttymislämpötila kuvaa lämpötilaa, jossa reagoiva aine pystyy ylläpitämään reaktioita ja palaminen voi jatkua. Syttymisenergian tarkoituksena on lämmittää pientä määrää reagoivaa ainetta, jolloin reagoiva aine saavuttaa itsesyttymislämpötilan ja reaktio pysyy näin käynnissä itsestään. Minimisyttymisenergia on energian vähimmäismäärä, jolla reaktiot voivat käynnistyä.

Taulukko 3.4 Kaasujen itsesyttymislämpötila ja minimisyttymisenergia ilmassa (Bartok & Sarofilm, 1991).

Kaasu	Kaava	Minimisyttymisenergia (mJ)	Itsesyttymislämpötila (°C)
Asetoni	C ₃ H ₆ O	1,15	465
Asetyleeni	C ₂ H ₂	0,03	305
Butaani	C ₄ H ₁₀	0,76	365
Etaani	C ₂ H ₆	0,42	472
Metaani	CH ₄	0,33	537
Propaani	C ₃ H ₈	0,40	470
Vety	H ₂	0,02	400

4. CFD-MALLINNUS

Numeerinen virtausdynamiikka (CFD) on laskennallinen keino ratkaista virtausta hallitsevat yhtälöt. CFD-laskennassa jatkuvat yhtälöt voidaan diskretoida ja ratkaista numeerisesti, jolloin nesteiden ja kaasujen vuorovaikutuksia voidaan simuloida todenmukaisesti.

Seuraavassa mallinnetaan CFD-mallinnusohjelmalla kaasupilviräjähdyks ja verrataan saatuja paineen nousun arvoja edellä esitettyihin laskennallisiin menetelmiin. Ensin muodostetaan CFD-malli ja sitten esitetään mallin ominaisuuksia. Seuraavaksi esitetään alimallit, joita käytetään laskennassa esimerkiksi turbulenssin mallinnukseen ja palamisen mallinnukseen. Lopuksi käydään läpi mallinnettavat tilanteet, esitetään reunaehdot ja suoritetaan simulointi määrättylle kaasupilvelle.

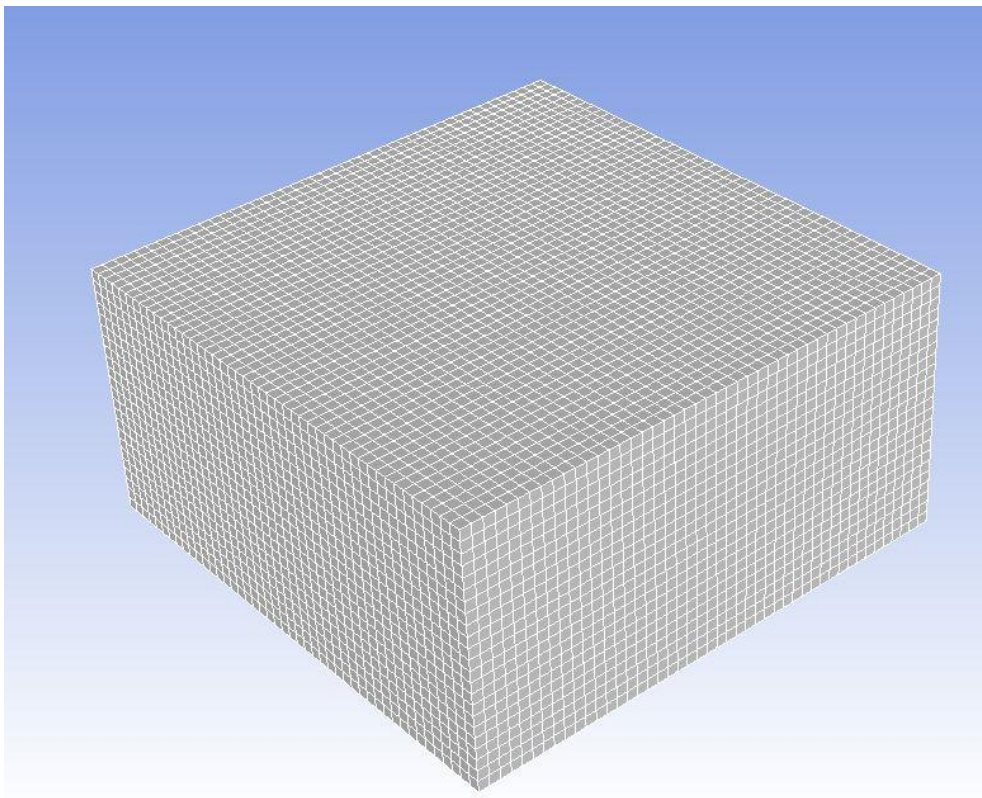
4.1 Tilan mallinnus

Luodaan SolidWorks-mallinnusohjelmalla pintamalli, joka kuvaa mallinnettavaa aluetta, jossa kemialliset reaktiot tapahtuvat. Pintamallissa mallinnetaan tarkasteltavan alueen reunat, jotka kuvaavat 5x5x2,5 metrin kokoisen huoneen seiniä. Mallinnettava alue voisi kuvata esimerkiksi varastotilaa, jossa sattuu kaasuvuoto.

4.2 Laskentaverkko

Laskentaverkko luodaan ANSYS Workbench -ohjelmistolla. Käytetään SolidWorks-ohjelmalla luotua pintamallia tilavuuden verkotukseen. Käytetään ohjelman oletusasetuksia laskentaverkon luomiseen. Pintamalli toimii verkotuksen reunapintoina. Pintamallin sisäosa verkotetaan laskentaverkoksi. Laskenta-alueessa on 48668 kuutiomaista laskentakoppia. Tarkasteltava alue on suorakulmainen, jolloin alue

verkotetaan suorakulmaisilla elementeillä. Suorakulmaisten elementtien johdosta verkon laatu on hyvä. Kuvassa 4.1 on esitetty laskentaverkko, jossa tilanteet on simuloitu.



Kuva 4.1. *Simuloitavan tilan laskentaverkko.*

4.3 Osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen

CFD-laskennassa luvussa 3. esitetyt osittaisdifferentiaaliyhtälöt ratkaistaan numeerisesti. Hallitsevat yhtälöt diskretoidaan eli osittaisdifferentiaaliyhtälöt muutetaan algebrallisiksi yhtälöiksi. Diskreeteistä yhtälöistä saadaan algebrallisten yhtälöiden ryhmä, joka voidaan ratkaista iteratiivisesti kontrollitulavuudessa. ANSYS Fluent käyttää kontrollitulavuusmenetelmää numeeriseen ratkaisuun.

Kontrollitulavuusmenetelmän (Finite Volume Method FVM) ideana on ensin luoda simuloinnille laskenta-alue, joka jaetaan pieniin kontrollitulavuuksiin eli koppeihin. Kopin keskipiste, solupiste, edustaa laskentakierroksella aina kontrollitulavuuden suureiden arvoja. Laskentakierroksella voidaan käyttää erilaisia menetelmiä solupisteen arvon laskemiseen diskretoiduista yhtälöistä.

Hallitsevat yhtälöt voidaan muuttaa kontrollitulavuuden reunojen yli tapahtuvaksi pintaintegraaliksi käyttämällä Gaussin divergenssiteoreemaa. Näin voidaan esimerkiksi lineaarisella approksimaatiolla laskea solupisteen arvo, kun arvot kontrollitulavuuden reunoilla tiedetään (Versteeg & Malasekera 2007, s.25)

$$\int_{CV} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} dV = \int_A \Phi_j n_j dA, \quad (4.1)$$

jossa Φ viittaa laskettavaan suureeseen. Kontrollitilavuuden solupisteen arvo saadaan nyt helpommin laskettua pintaintegraalina esimerkiksi lineaarisella approksimaatiolla kontrollitilavuuden reunoilta. Lopulta yhtälöt saadaan muutettua algebralliseen muotoon, jossa on kertoimia a ja suureen arvoja Φ kontrollitilavuuden reunoilta, joiden avulla suureen arvo solupisteessä ratkaistaan

$$a_p \Phi_p = \sum a_{nb} \Phi_{nb}, \quad (4.2)$$

jossa indeksi p viittaa solupisteeseen ja indeksi nb viittaa kontrollitilavuuden naapuripisteisiin kontrollitilavuuden reunoille 1-, 2- tai 3-ulotteisessa koordinaatistossa.

Syntyneet yhtälöryhmät voidaan ratkaista niin, että yksi suure ratkaistaan jokaisessa laskenta-alueen kontrollitilavuudessa yhdellä aika-askeleella. Vaihtoehtoisesti voidaan ratkaista kaikki yhtälöryhmät yhdessä kontrollitilavuudessa kerralla ja edetä näin koko laskenta-alue lävitse.

4.4 Mallinnuksen reunaehdot

Mallinnuksen reunaehdoiksi annettiin tilan seinille lämpötilareunaehdoksi 300 kelviniä. Tilassa olevalle kaasuseokselle annettiin alkuehdoksi reagoivan kaasun massaosuus ja ilman massaosuus alueessa. Mallinnetaan tilanteet niin, että alkutilanteessa kaasut ovat stoikiometrisessä tilassa.

4.5 Turbulenssin mallinnus

Kaasupilven syttyessä liekkirintama muuttuu nopeasti laminaarista turbulentiksi. Turbulentti virtaus sekoittaa liekkirintamassa polttoainetta ja hapetinta keskenään, jolloin palaminen tehostuu. Turbulenssin mallintaminen tarkasti vaatisi, että kontrollitilavuuksien koon tulisi olla niin pieni, että pienimmät turbulenssin mikroskaalat pystyttäisiin mallintamaan. Turbulenssimalleilla on kuitenkin mahdollista kuvata turbulenssia todenmukaisesti ilman ylivoimaisen suurta laskentatehon tarvetta.

Turbulenttia virtausta hallitsevat yhtälöt voidaan jakaa keskiarvo- ja heilahduskomponenttiin

$$u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_i. \quad (4.3)$$

Virtausta hallitsevat liikemääräyhtälöt aikakeskiarvotetaan ja saadaan aikakeskiarvomuuuttujia hallitsevat yhtälöt sijoittamalla (3.2) yhtälöihin nopeuksien tilalle nopeuden heilahtelu ja -keskiarvo. Keskiarvottamisen myötä hallitseviin yhtälöihin muodostuu heilahtelusta aiheutuvia ylimääräisiä termejä, joita kutsutaan Reynoldsin jännityksiksi

$$\bar{\tau}_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j}. \quad (4.4)$$

Reynoldsin jännitysten laskemiseen käytetään turbulenssimalleja, kuten $k-\varepsilon$ -malli tai $k-\omega$ -malli. Käytetään kaasupilviräjähdyksen turbulenssin mallinnuksessa $k-\omega$ SST-turbulenssimallia, joka on paranneltu malli $k-\varepsilon$ -mallista.

4.6 Palamismalli

Turbulenssin ja palamiskemian välistä kytettä voidaan mallintaa palamismallien avulla. Palamismallien tarkoituksena on laskea arvoja reaktionopeudelle $\dot{\omega}$, joka tarvitaan yleisissä yhtälöissä komponenttien massataseen tarkasteluun, yhtälö (3.3).

4.6.1 Eddy Dissipation Model (EDM)

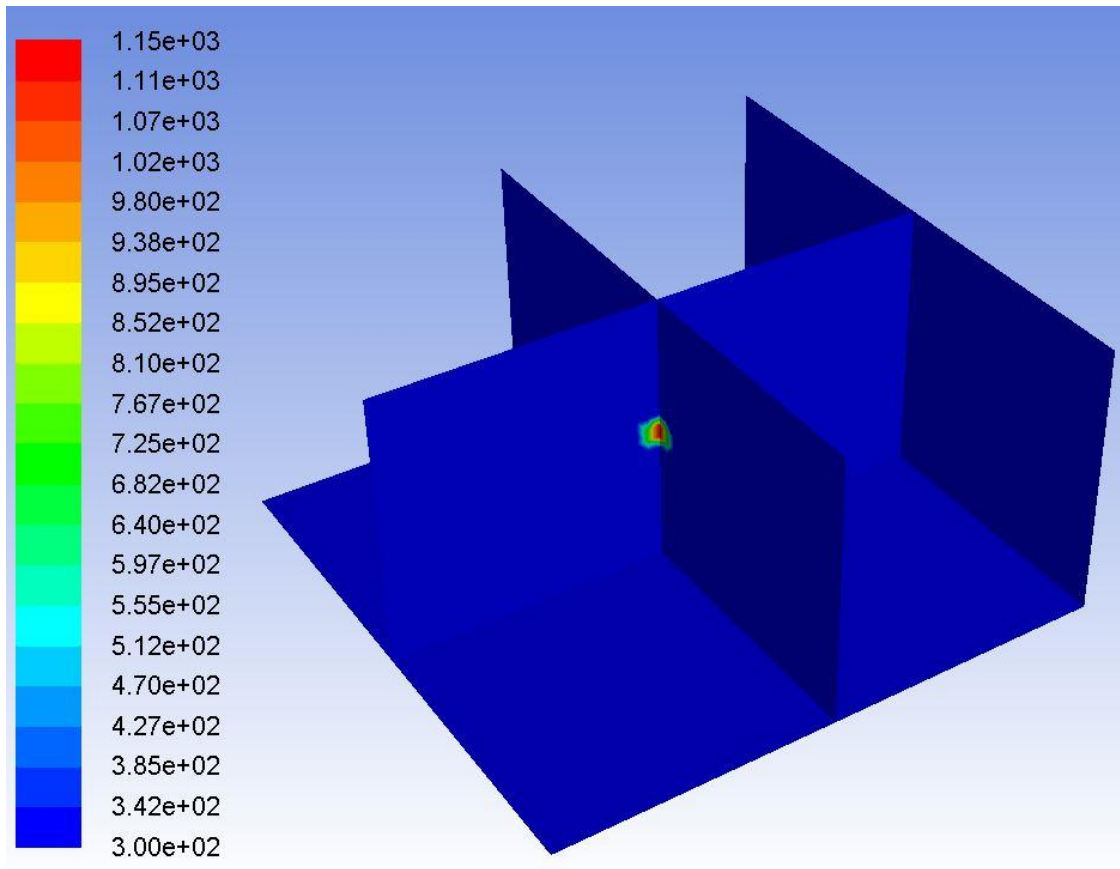
Eddy Dissipation Model -palamismalli olettaa, että kaikki virtauksessa tapahtuvat kemialliset reaktiot tapahtuvat äärettömän nopeasti. Reaktiot tapahtuvat välittömästi, kun reagoivat aineet pääsevät kosketuksiin keskenään turbulenssissa virtauksessa. Näin ollen turbulenssin sekoittamisen aikaskaala määrittelee reaktionopeuden. EDM-malli on yksinkertainen palamismalli, joka toimii vain yksi- tai kaksivaiheisilla reaktiomekanismeilla.

4.6.2 Eddy Dissipation Concept (EDC)

EDC-palamismallilla voidaan kuvata monivaiheisia reaktiomekanismeja. EDC-mallissa reaktioiden oletetaan tapahtuvan vasta, kun reagoivat aineet pääsevät kosketuksiin molekyyliatasolla pienissä turbulenteissa rakenteissa, hienorakenteissa. Hienorakenteille määritetään oma aika- ja tilavuuskaala. Reaktiot tapahtuvat hienorakenteissa hienorakenteen aikaskaalan määrittämän ajan. Hienorakenteessa aineet oletetaan täydellisesti sekoittuneiksi ja kemialliset reaktiot saadaan laskettua numeerisesti integroimalla, CFD-laskennan iteraatioiden välissä. Reaktionopeudet taseyhtälöihin saadaan laskettua, kun kaasukomponenttien määrät hienorakenteessa on saatu ratkaistua. EDC-malli on laskennallisesti raskas malli, mutta toisaalta mallilla voidaan kuvata monivaiheisia reaktiomekanismeja ja näin tulokset ovat myös todennäköisempiä.

4.7 Mallinnettavat tilanteet

Mallinnetaan 5x5x2,5 metrin kokoinen tila, joka täytetään ilma-kaasuseoksella. Mallinnetaan ANSYS Fluent -ohjelmistolla kaasupilven palamisreaktio, kun kaasuseos syttyy keskeisesti. Suoritetaan mallinnus ajasta riippuvana. Syttyminen toteutetaan mallintamalla tarkasteltavan tilan keskelle kuuma pistelähde, josta reaktio saa riittävästi energiaa käynnistyäkseen. Pistelähde voisi kuvata esimerkiksi tulitikun sytyttämistä tilassa. Kuvassa 4.2 on esitetty kaasuseoksen sytyttäminen keskeisesti. Mallinnettava alue on suorakaiteen muotoinen. Kuvassa alataso ja oikealla oleva taso ovat mallinnettavan alueen seinä ja lattia. Ristiin menevät tasot ovat aputasoja visualisointia varten.



Kuva 4.2. Kaasuseoksen sytytys ja lämpötila-asteikko (K)

Palaminen tapahtuu vakio-tilavuudessa ja adiabaattisesti. Suoritetaan mallinnus metaani-ilma- ja propaani-ilmaseokselle.

5. LASKENTATULOKSET

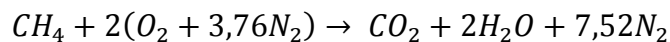
Tässä luvussa suoritetaan palamisen virtaussimulointi metaani-ilma- ja propaani-ilmaseokselle. Esitetään mallinnuksen tulokset ja vertaillaan tuloksia mitattuihin tuloksiin ja laskettuihin arvoihin. Tarkastellaan paineenousua eri ajan arvoilla.

5.1 Simulointi

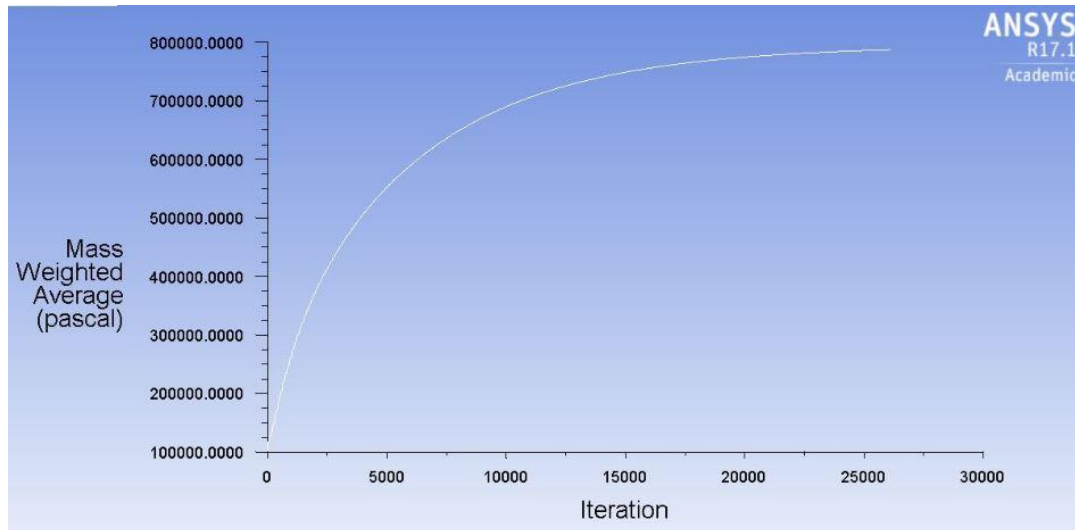
Simulointi suoritettiin ajasta riippuvana. Aika-askeleena käytettiin 0,001 sekuntia. Jokaisella aika-askeleella iteroidaan 100 kierrosta hallitsevia yhtälöitä, jolla varmistetaan, että tulos saadaan konvergoitumaan. Virtaussimuloinnin tuloksista tarkasteltiin aikaa, jolloin paine saavuttaa maksimiarvonsa. Simulointi suoritettiin siten, että aluksi kaasuseos oli 62,5 m³ tilassa stoikiometrisessä pitoisuudessa. Laskentaohjelmaan kaasujen osuudet annettiin massaosuuksina. Tilan keskelle mallinnettiin pieni alue, jonka lämpötilaksi asetettiin 1150 kelviniä, jolloin reaktio saatiin käynnistymään. Laskentaa jatkettiin siihen asti, kunnes palamisesta aiheutuva paineen nousu ei enää merkittävästi kasvanut tarkasteltavassa tilavuudessa. Mallinnuksessa käytettiin luvussa 3. esitettyjen hallitsevien yhtälöiden ratkaisemiseen tiheyspohjaista ratkaisijaa, joka ottaa paremmin huomioon virtauksen kokoonpuristuvuuden kuin painepohjainen ratkaisija. Turbulenssimallina käytettiin *k- ω -SST*-mallia ja palamismallina Eddy Dissipation Conceptia.

5.2 Metaani-ilmaseos

Ensimmäinen simulointi suoritettiin stoikiometriselle metaani-ilmaseokselle, joka täytti koko tarkasteltavan tilan. Hapelle, metaanille ja typelle annettiin stoikiometriset massaosuudet alkuehdoiksi. Metaanin stoikiometrinen massaosuus on noin 0,058 ja hapen noin 0,2194. Typpikaasun osuus tilavuudesta on noin 0,722. Palamiselle käytettiin yksinkertaista palamisen reaktiomallia, jossa metaani reagoi ilman kanssa ja lopputuotteina syntyy hiilidioksidia ja vettä. Ilmassa oleva palamaton typpikaasu siirtyy savukaasuun sellaisenaan.



Kuvassa 5.1 on esitetty ANSYS Fluentilla simuloitu paineen nousu ajan funktiona. Paine saavuttaa maksimiarvonsa noin ajan hetkellä 0,26 sekuntia ja saa paineen arvon $7,87 \times 10^5$ Pa.

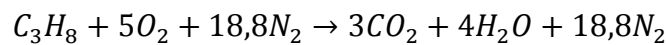


Kuva 5.1. Metaani-ilmaseoksen paineen kehitys palamisessa.

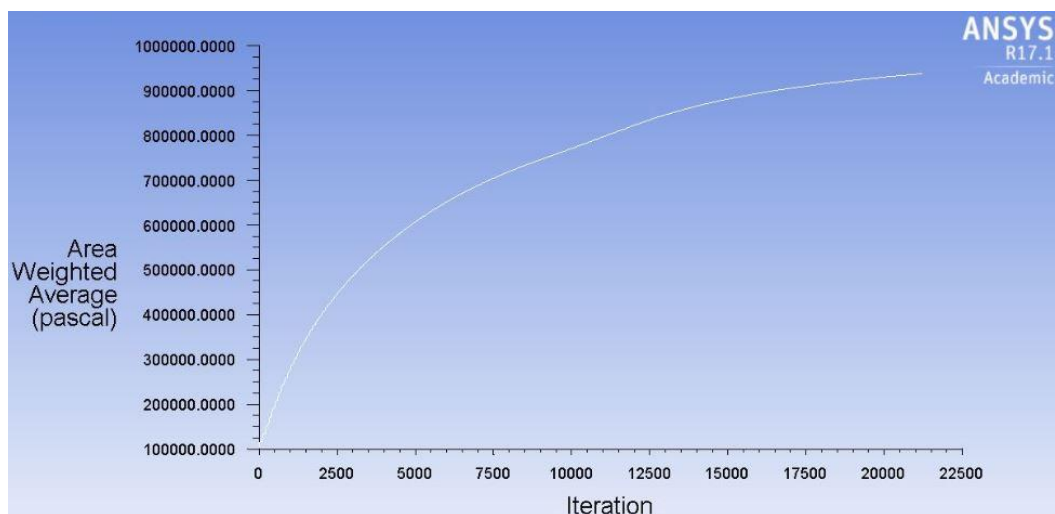
Paineen kehitys on kuvattu ottamalla massapainotettu keskiarvo tarkasteltavasta alueesta. Paineen nousunopeudelle saadaan arvo 30 bar/s.

5.3 Propani-ilmaseos

Toinen simulointi suoritettiin stoikiometriselle propani-ilmaseokselle. Stoikiometrisessä tilassa propanin massaosuus on noin 0,0604, hapen 0,219 ja typen 0,7206. Simuloinnissa käytetään propanin palamiselle yksinkertaista mallia, jossa propani reagoi hapen kanssa ja lopputuotteina syntyy hiilidioksidia ja vettä. Palamaton tyyppi siirtyy sellaisenaan lopputuotteisiin.



Kuvassa 5.2 on esitetty simuloitu paineennousu ajan funktiona.



Kuva 5.2. Propani-ilmaseoksen paineen kehitys palamisessa.

Propani-ilmaseoksen paineen kehitys on kuvattu ottamalla tilavuuspainotettu keskiarvo tarkasteltavasta alueesta. Paineen nousunopeudelle saadaan arvo 41 bar/s.

5.4 Tulosten verifiointi

Deflagraation synnyttämällä paineen nousunopeudella ja palamisen jälkeisellä maksimipaineella suljetussa tilassa voidaan kuvata eri kaasujen palamisominaisuuksia. Kaasuille voidaan kokeellisesti määrittää räjähdysvakio K_G . Räjähdysvakiota käytetään kaasu- ja pölyräjähdysten paineenpurkulaitteiden suunnitteluvarvona. Räjähdysvakiota pidetään verrannollisena paineen nousunopeuden ja tarkasteltavan tilavuuden kuutiojuuren tuloon

$$K_G = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V^{\frac{1}{3}}. \quad (5.1)$$

Kokeellisesti on todettu, että räjähdysvakio kuitenkin kasvaa tilavuuden kasvaessa (Hurley et al. 2016.) Verrataan simuloimalla saatuja tuloksia kokeellisiin K_G -arvoihin, kun simuloinnista saatu paineen maksimiarvo ja aika paineen nousulle tiedetään. Verrataan tuloksia myös Van den Bulckin (2005) esittämälle yhtälölle K_G -arvon laskemiselle

$$K_G = 4,836g_b \left[\left(\frac{P_{max}}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma_u}} - 1 \right] P_{max} S_f, \quad (5.2)$$

jossa γ_u on keskimääräinen lämpökapasiteettien suhde isentrooppisessa puristuksessa palamisen aikana, ja sille voidaan antaa keskimääräiseksi arvoksi 1,33. g_b on palamistuotteiden lämpökapasiteettien suhde ja sille voidaan antaa keskimääräiseksi arvoksi 1/0,900. S_f on reagoivalle seokselle ominainen palamisnopeus paineen saavutettua maksimiarvonsa. P_{max} on teoreettinen, vakio-tilavuudessa adiabaattisesti tapahtuvan palamisen paineen arvo ja se saadaan laskettua kemiallisten reaktioiden tasapainosta esimerkiksi Gaseq-ohjelmistolla. Yhtälöllä voidaan arvioida teoreettista yläarvoa paineennousulle.

Taulukossa 5.1 on vertailtu kokeellisia arvoja ja korrelaatiolla (5.2) saatuja arvoja CFD-laskennalla saatuihin räjähdysvakion K_G -arvoihin. Nagy et al. (1971) ovat tehneet metaani- ilma- ja propani-ilmaseokselle palamistestejä 25,6 m³:n tilavuudessa. Taulukossa 5.1 esitetyt arvot on mitattu stoikiometrisessä tilanteessa. Propani-ilmaseokselle on mitattu kaksi kertaa paineen nousunopeus, joista arvoiksi saatiin noin 300 bar/s ja 500 bar/s. Korrelaatiolla (5.2) laskettuihin arvoihin oletetaan metaani-ilmaseoksen palamisnopeudeksi 0,45 m/s ja propani-ilmaseokselle 0,75 m/s (Metghalchi & Keck 1980). Lasketaan lisäksi yhtälön (3.32) mukainen arvo metaanin räjähdysvakiolle

pallomaiselle tilanteelle, jossa tilavuus pysyy samana kuin muissa tilanteissa eli $62,5 \text{ m}^3$. Suurin paineen muutosnopeus saadaan kuvasta 3.5. Propanille voidaan laskea vastaavasti paineen suurimmaksi muutosnopeudeksi $42,1 \text{ bar/s}$. Räjähdysvakion arvot metaanille ja propanille on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. *Simuloidun, lasketun ja mitatun paineen nousunopeuden eli räjähdysvakion K_G vertailu.*

	Metaani-ilma	Propani-ilma
Räjähdysvakio K_G (bar m/s)		
$62,5 \text{ m}^3$ Simulointi	105	176
$25,6 \text{ m}^3$ (Nagy et al. 1971)	114 ± 6	$\sim 400 \pm 100$
Korrelaatio (5.2)	87	163
Korrelaatio (3.32)	129	167

Mitattujen tulosten saaminen on hankalaa, koska räjähdysten mittaamiseen ja suorittamiseen sisältyy aina riskejä. Lisäksi mittaus on vaikea uusina niin, että tuloksista saataisiin yhteneviä. Mittausalueen alkutilanne vaikuttaa suuresti paineenkehitykseen räjähdyksessä. Reagoivan kaasun ja ilman tiheyseroista johtuen alkutilanteessa kaasuseosta tulee sekoittaa stoikiometrisen seoksen saavuttamiseksi. Toisaalta tarkasteltavassa alueessa oleva pienikin turbulenssi lyhentää aikaa maksimipaineen saavuttamiseen palamisessa, koska kaasuseoksen sekoittuessa palaminen tehostuu.

Räjähdyspaineen nousunopeus on hyvin riippuvainen tarkasteltavasta tilasta. CFD-mallinnuksella on mahdollisuus simuloida paineen nousunopeuden arvoja erilaisissa tiloissa, joissa on esimerkiksi turbulenssia virtausta kasvattavia tekijöitä kuten koneita, työtasoja tai tilan muoto on muuten turbulenssia kasvattava. Tilat joihin vaarallinen kaasupilvi voi muodostua ovat yleensä ilmastoituja, jolloin ilmastoinnista aiheutuva virtaus voi sekoittaa reagoivaa kaasuseosta ja näin voimistaa paineen nousunopeutta.

Vertaamalla eri tapoja määrittää arvo räjähdysvakiolle huomataan, että tarkkaa lukua on hyvin vaikea todentaa. CFD-simuloinnilla voidaan mallintaa paineen nousunopeutta tilanteissa, joissa otetaan huomioon tilassa olevat esteet sekä ilmanvaihdosta johtuva kaasun ja ilman sekoittuminen. CFD-mallinnus sopii siis tilanteisiin, joissa mallinnettavassa tilassa on turbulenssia aiheuttavia tekijöitä. Toisaalta toimivan CFD-mallin muokkaaminen vaatii suurta ammattitaitoa mallintajalta. Lisäksi simulointimalli, joka kuvaa hyvin tilannetta vaatii vielä nykypäivänä erittäin suurta laskentatehoa tietokoneelta.

6. PAINEENPURKUTEKNIIKAT

Tässä luvussa käydään läpi standardeja, joita sovelletaan tällä hetkellä kaasuräjähdyksien paineenpurkutekniikoihin. Lisäksi käydään läpi paineenpurkutekniikoita.

6.1 Vallitsevat standardit

Standardien SFS-EN 14797, SFS-EN 14460 ja SFS-EN 14994 avulla voidaan valita suojausjärjestelmät kaasuräjähdyksen paineenkevennykselle. Standardien avulla voidaan valita suojausjärjestelmiä suojaamaan haluttua kohdetta.

Standardin SFS-EN 14994 pohjalta sovelletaan räjähdyspaineen kevennyslaitteiden mitoitusta, käyttöä ja ohjeistusta kaasuräjähdyksien painevaikutuksen osalta. Standardin SFS-EN 14994 avulla voidaan arvioida räjähdystilan ulkopuolelle ulottuvaa liekkiä ja liekin paineen vaikutusta. Standardilla voidaan arvioida myös miten säiliöt ja tilat tulisi tukea rekyylivoimia vastaan sekä miten kevennyskanavat, lähtölämpötila ja lähtöpaine vaikuttavat paineenkehitykseen.

Standardissa SFS-EN 14460 kuvataan vaatimukset, jotka koskevat räjähdyspaineen- ja räjähdysiskunkestäviä laitteistoja. Standardia voi soveltaa laitteistoihin, joissa voi tapahtua humahdus, mutta ei detonaatiota. Standardia sovelletaan prosessiastioihin, järjestelmiin ja laitteistoihin, jotka ovat metallirakenteisia.

Standardissa SFS-EN 14797 esitetään vaatimukset, jotka koskevat räjähdyspaineen kevennyslaitteita suljetuissa tiloissa tapahtuvien sisäpuolisten pöly-, höyry- tai kaasuräjähdyksen käsittelyssä. Standardin avulla voidaan määrittää suunnittelu-, tarkastus-, merkintä-, dokumentointi- ja pakkausvaatimukset räjähdyspaineen kevennyslaitteille. Kevennyslaitteet pitää suunnitella standardin mukaisesti niin, että räjähdysten sattuessa kevennyslaite pystyy avaamaan paineenpurkauksen halutussa paineen arvossa välittömästi, jotta räjähdysten ylipaine ei ylitä rakenteen suunniteltua paineenkestävyyttä.

6.2 Räjähdyspaineen kevennyslaitteiden rakenteita

Tässä luvussa käydään läpi paineenpurkumenetelmiä. Räjähdyspaineen purussa on huomioitava, että purettaessa painetta kevennyslaitteiden avulla, palamatonta ja palavaa kaasua purkautuu ulos räjähtävästä tilasta. Kevennysratkaisut on sijoitettava niin, ettei liekkien suihkupurkaus aiheuta vaaraa räjähdysvaarallisen tilan ulkopuolella oleville ihmisille tai rakennuksille. Kevennyksen läpi purettava räjähdyspaine on myös suunnattava niin, että ihmiset eivät pääse purkualueelle räjähdysvaaran aikana. (SFS-EN 14994.)

Tärkeänä asiana voidaan pitää myös kevennyslaitteiden huoltoa ja säätöä. Toimimattomat turvalaitteet voivat aiheuttaa paineen liiallisen kasvun, jolloin koko rakenne saattaa vaurioitua. Kevennyslaitteet tulee tarkastaa vuosittain ja aina käyttötapahtumien jälkeen, jolloin laitteiston toiminta voidaan varmentaa.

6.2.1 Painovoimaisesti kuormitettu kevennysluukku

Räjähdystilaa tehdään paineenpurkuaukko, joka peitetään saranoidulla peitelevyllä. Painovoimaisesti kuormitettu peitelevy peittää kevennysaukon. Peitelevy sovitetaan aukkoon niin, että mahdolliset vuodot minimoidaan esimerkiksi tiivisteiden avulla. Painovoimaisen käytön vuoksi käyttöasennolla on suuri merkitys kevennysluukun toiminnalle. (SFS-EN 14797.)

Räjähdyksen paineen nousu kohdistaa voiman peitelevyyn ja peitelevy nousee ylös kevennysaukosta, jolloin räjähdyksen paineen nousu saadaan purkautumaan kevennysaukosta. Räjähdyksen loputtua, kun paine-ero räjähdystilaa ja räjähdystilaa ulkopuolisen ympäristön välillä laskee tarpeeksi pieneksi, peitelevy yleensä tippuu painonvoiman ansiosta takaisin alkuperäiselle paikalleen. Painovoimaisesti toimivat kevennysluukut on yleensä suunniteltu toimimaan uudestaan räjähdyksen jälkeen. Painovoimaisesti kuormitettuun levyyn kohdistuu räjähdyksen ja ulkoisen paineen välillä paine-erosta johtuva voima sekä peitelevyn massasta johtuva gravitaatiovoima. Yksinkertaisessa tapauksessa kokonaisvoima voidaan esittää

$$F(t) = [P(t) - P_0]A_{levy} - mg, \quad (6.1)$$

jossa $P(t)$ on räjähdyksestä kehittyvä paineen arvo, P_0 on ympäristön paine, m on peitelevyn massa, A_{levy} on paineenpurkuaukon pinta-ala ja g normaali putoamiskiihtyvyyden.

Kun peitelevy on asennettu esimerkiksi kattoon vaakatasoon, peitelevyn pinta-alalla ja massalla voidaan yksinkertaisesti määrittää ennalta paineen arvo, jolla kevennysluukku avautuu purkaen ylipaineen räjähdystilassa

$$P_{stat} = \frac{F}{A_{levy}} = \frac{m * g}{A_{levy}}, \quad (6.2)$$

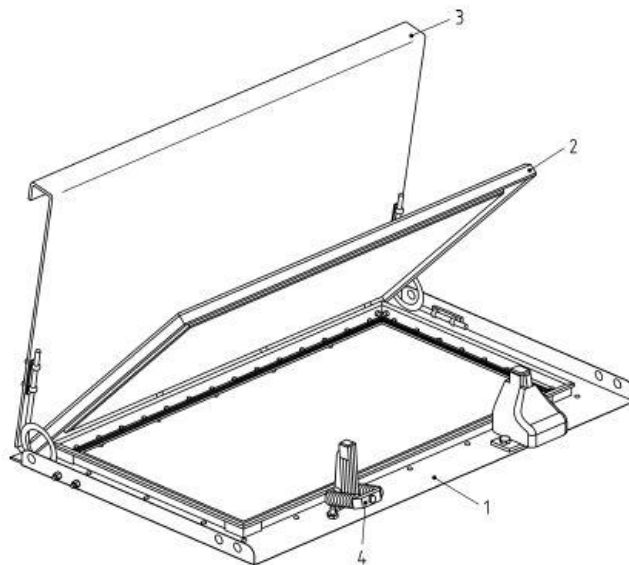
6.2.2 Jousikuormitettu kevennysluukku

Jousikuormitettu kevennysluukku toimii painovoimaisen kevennysluukun tavoin uudelleen sulkeutuvasti. Räjähdyksen esiintyessä jousikuormitettu kevennysluukku avautuu, räjähdyksen ylipaineen johdosta halutussa paineessa, ja näin räjähdyksen paine pääsee purkautumaan vapaasti. Räjähdyksen jälkeen jouseen kertynyt potentiaalienergia

siirtää peitelevyn takaisin tukkimaan kevennysaukon. Haluttu paineenarvo, jossa kevennysluukku toimii, voidaan yksinkertaisessa tapauksessa määrittää jousen jousivakion ja peitelevyn pinta-alan avulla

$$P_{stat} = \frac{F_{jousi}}{A_{levy}} = \frac{k * x}{A_{levy}}, \quad (6.3)$$

jossa k on jousen jousivakio ja x on jousen etäisyys tasapainosta. Jousisto pitää esijännittää niin, että pienet painenvaihtelut eivät avaa kevennysluukkuja, jolloin normaalissa tilanteessa ei ylimääräistä vuotoa pääse syntymään. Jousikuormitetulle kevennysluukulle määritetään tietty paineen raja-arvo, jonka ylittyessä kevennysluukku aukeaa ja räjähdysen jälkeen jousisto sulkee kevennysaukon. Jousikuormitettu kevennysluukku voidaan asentaa kaikkiin käyttöasentoihin, joka saattaa helpottaa tilannetta verrattuna painovoimaisen kevennysluukun käyttöön. Kuvassa 6.1 on esitetty jousikuormitettu kevennysluukku. (SFS-EN 14797.)



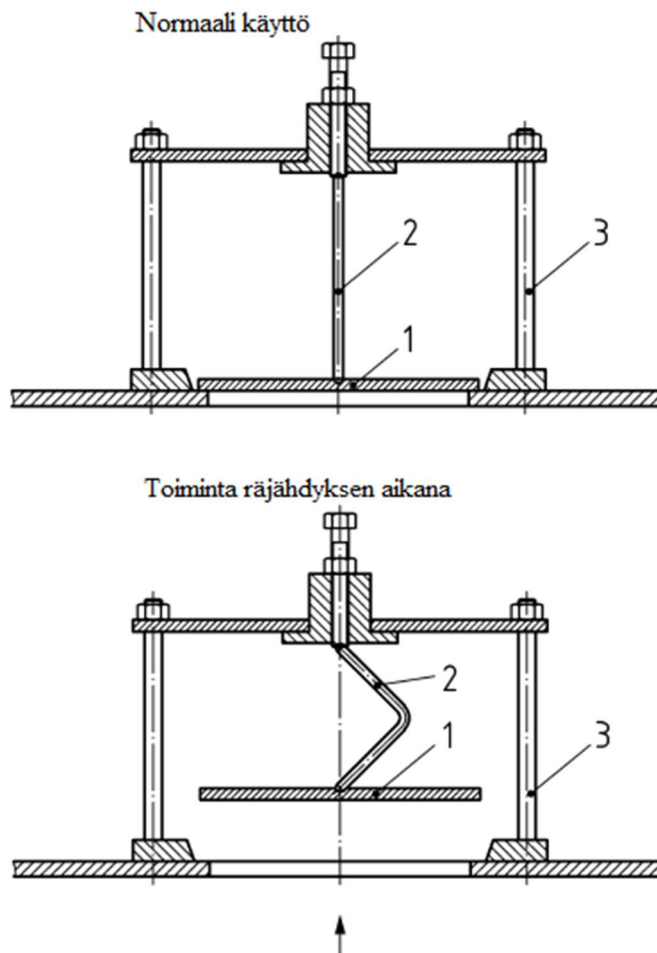
Kuva 6.1. Jousikuormitettu kevennysluukku (SFS-EN 14797, s.36)

Kuvassa osa 1 on kevennyslaitteen tukikehys, joka kiinnitetään suojattavaan kohteeseen. Osa 2 on kevennysluukku, joka aukeaa paineen noustessa riittävän suureksi. Osa 3 on suojalevy ja osa 4 on pidike, joka pitää kevennysluukun kiinni prosessin normaalin toiminnan aikana.

6.2.3 Nurjahtavaan sauvaan perustuva kevennysluukku

Nurjahtavaan sauvaan perustuva kevennysluukku toimii niin, että nurjahtava sauva toimii pidikkeenä paineen nousua vastaan. Normaalitilanteessa tukisauva pitää kevennysluukun paikallaan ja kevennysluukku sulkee kevennysaukon. Laitteen runko-osa tukee

tukivauvaa ja kevennysluukkuja ja tiivistää aukon niin, ettei normaalissa toiminnassa aukon lävitse tapahdu ylimääräistä vuotoa. Räjähdyksen paineen noususta aiheutuva voima vaikuttaa kevennysluukun välityksellä tukisauvaan ja saa sauvan nurjahtamaan ennalta määrätyn paineen nousun osalta ja näin paine pääsee purkautumaan tilasta. Kuvassa 6.2 on esitetty rakenteellinen kuva nurjahtavaan sauvaan perustuvan kevennysluukun toiminnasta. Kuvassa osa 1 on laitteen kevennyslevy, osa 2 on nurjahtava sauva ja osa 3 on kevennyslaitteen tukirakenne. (SFS-EN 14797.)



Kuva 6.2. Nurjahtavaan sauvaan perustuva paineenkevennysluukku (mukaiillen SFS-EN 14797, s.38)

Paineen arvo, joka tarvitaan, että sauva nurjahtaa voidaan määrittää, kun tunnetaan kevennysluukun pinta-ala, nurjahtavan sauvan pituus ja materiaaliominaisuudet sauvalle

$$P_{stat} = \frac{F_n}{A_{levy}}, \quad (6.4)$$

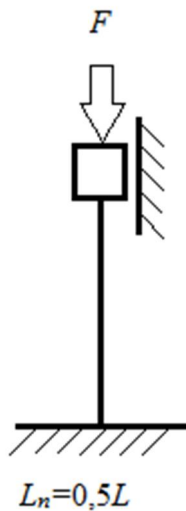
jossa F_n on nurjahdusvoima. Nurjahdusvoima riippuu tukisauvan kimmokertoimesta E , sauvan jäyhyysmomentista I ja sauvan nurjahduspituudesta L_n

$$F_n = \frac{\pi^2 EI}{L_n^2}. \quad (6.5)$$

Kimmokerroin on materiaaliriippuvainen ja esimerkiksi teräkselle suurusluokkaa 210 GPa. Jäyhyysmomentti sauvalle, jonka poikkipinta-ala on ympyrä, voidaan määrittää sauvan säteen r avulla:

$$I = \frac{\pi}{4} r^4. \quad (6.6)$$

Nurjahduspituus riippuu paineenkevennysluukun rakenteesta. Jos, tukisauva on kiinteästi kiinnitetty toiseen päähän ja voima kohdistuu avoimeen kevennysluukkuun, voidaan tapaus määritellä Eulerin perusnurjahdustapauksena kuvan 6.3 mukaisesti. Tällöin nurjahduspituus on puolet nurjahtavan sauvan pituudesta (Outinen et al. 2007).



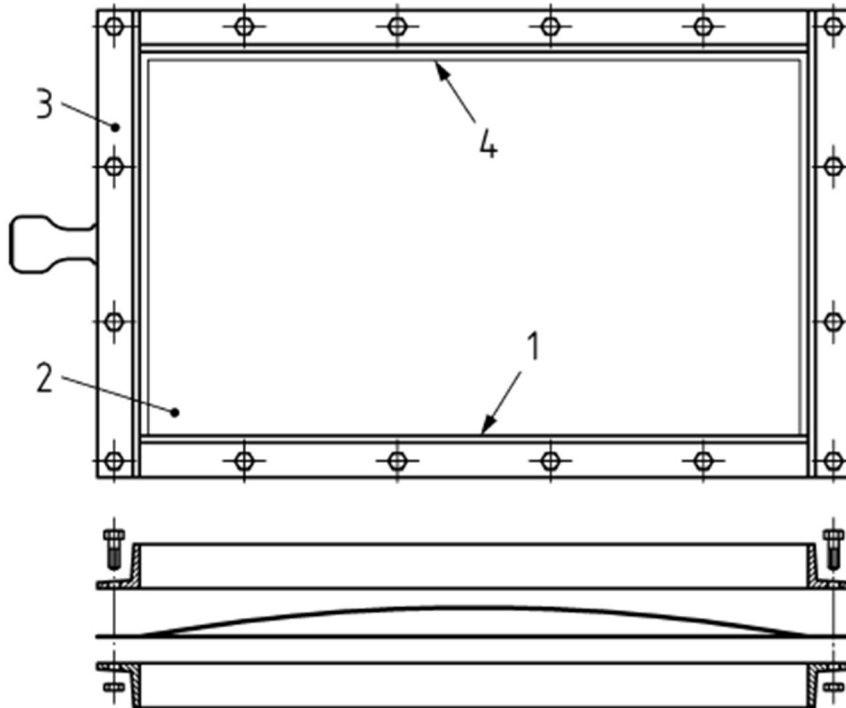
Kuva 6.3. Eulerin perusnurjahdustapaus ja nurjahduspituus

Nurjahtavaan sauvaan perustuvassa paineenkevennysluukussa nurjahtanut sauva on poistettava ja vaihdettava uuteen räjähdysen jälkeen. Uudella tukisauvalla kiristetään kevennysluukku tiiviisti paikoilleen. Rakenteesta vaihdetaan ainoastaan nurjahtanut sauva, mutta laitteiston muut osat voidaan käyttää uudelleen räjähdysen paineenpurun jälkeen.

6.2.4 Murtolevyllä varustettu kevennysluukku

Murtolevyllä varustettu kevennyslaite toimii räjähdysen sattuessa siten, että yhdestä tai useammasta murtolevystä koottu levykerros avautuu, ja näin muodostaa tarvittavan kevennysaukon paineen purulle, kun räjähdyspaine saavuttaa määrätyn arvon. Murtolevy on kertakäyttöinen, joten levy pitää vaihtaa uuteen, kun murtolevy on avautunut. Murtolevy voidaan kiinnittää suoraan suojattavaan kohteeseen tai kiinnitys voidaan tehdä

tukikehyksen avulla. Kuvassa 6.4 on esitetty murtolevyyn perustuva paineenkevennysluukun rakenne. (SFS-EN 14797.)

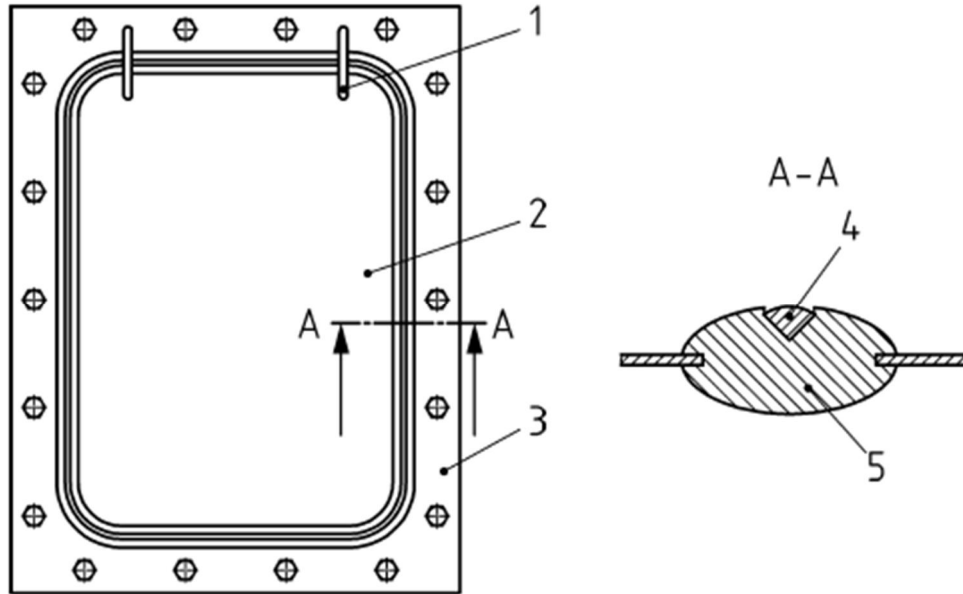


Kuva 6.4. Murtolevyyn perustuva paineenkevennysluukku (SFS-EN 14797, s. 40)

Kuvassa 6.4 osa 1 on rakenteen kiinteä sivu, joka pysyy räjähdyksessä paikallaan. Osa 2 on murtolevy, joka avautuu räjähdysten aikana, muodostaen kevennysalan. Osa 3 on rakenteen tukikehys, jolla rakenne kiinnitetään suojattavaan kohteeseen. Osanumero 4 osoittaa sivut, jotka myötävät räjähdysten aikana.

6.2.5 Ponnahduslevy

Räjähdyksen paineen kevennyslaite voidaan toteuttaa myös niin, että kevennyslevy tiivistetään joustavan muovi- tai kumitiivisteiden avulla tukikehykseen. Paineen noustessa tarpeeksi suureksi, kevennyslevyyn kohdistuva voima irrottaa kevennyslevyn tiivisteestä, ja paine pääsee purkautumaan syntyvän aukon kautta. Ponnahduslevy voidaan käyttää uudelleen räjähdysten jälkeen, tiivistämällä levy takaisin paikoilleen. Avautumispainetta voidaan muokata muokkaamalla kevennyslevyn koon ja tiivisteiden ominaisuuksien. Kuvassa 6.5 on esitetty ponnahduslevyllä varustetun kevennyslaitteen rakennekuva. (SFS-EN 14797.)

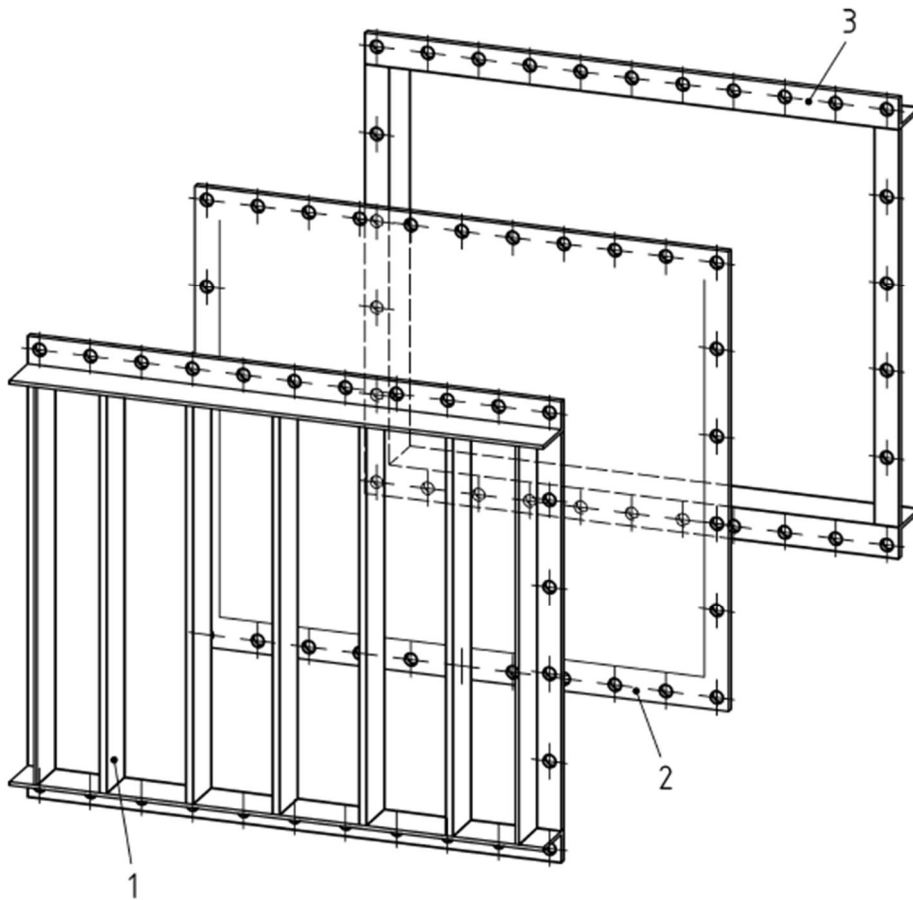


Kuva 6.5. Ponnahduslevyllä varustettu paineenkevennyslaite (SFS-EN 14797, s.42)

Kuvassa 6.5 osa 1 on kevennyslevyn pidätintappi, jonka tehtävä on estää räjähdyksessä irtoavaa kevennyslevyä sinkoutumasta hallitsemattomasti ympäristöön. Osa 2 on räjähdyksessä irtoava kevennyslevy. Osa 3 on laitteen tukirakenne, joka kiinnitetään suojattavaan kohteeseen. Osa 4 on kiristin, jolla joustava muovi- tai kumitiiviste kiristetään niin, että kevennyslevy pysyy paikoillaan prosessin normaalissa toiminnassa. Osa 5 on muovi- tai kumitiiviste, joka tiivistää tukilevyn, niin ettei ylimääräistä vuotoa prosessin normaalin käytön aikana pääse syntymään laitteen läpi. Tiivisteiden ominaisuuksien mukaan kevennyslevy irtoaa räjähdysten voimasta tukirakenteesta.

6.2.6 Vastapainetuki

Vastapainetuella toimiva räjähdyspaineen kevennyslaite perustuu murtuvaan kevennyslevyyn, mutta kevennyslaite pystyy estämään levyn murtumisen vastapaineiskussa. Kevennyslaite koostuu tukikehyksestä, kevennyslevystä ja vastapainetuesta, joka voi olla kiinteä tai avautuva. Räjähdystilanteessa kevennyslaite toimii normaalisti ja murtolevy avautuu määrätyn paineen ylittyessä avaten kevennysaukon paineen purulle. Kevennyslevy tulee vaihtaa uuteen, kun paine on rikkonut kevennyslevyn. Tilanteessa, jossa tapahtuu vastapaineisku normaalia avautumissuuntaa vastaan, vastapainetukiritilät tukevat kevennyslevyä niin ettei kevennyslevy pääse repeämään. Kuvassa 6.6 on esitetty vastapainetuella toimivan kevennysrakenteen rakenteellinen kuva. (SFS-EN 14797).



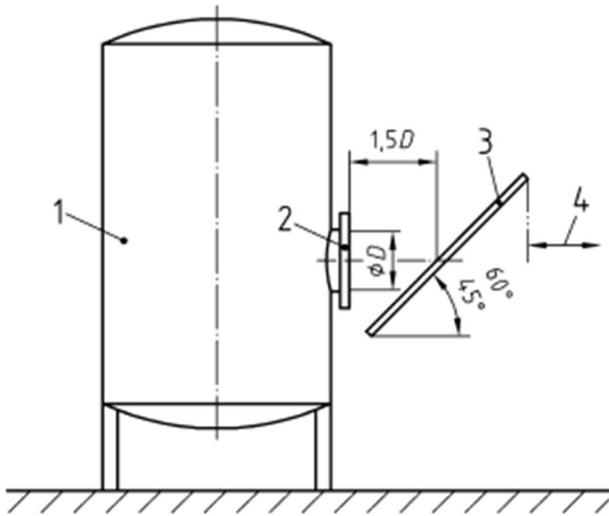
Kuva 6.6. Vastapainetuellinen paineenkevennysluukku (SFS-EN 14797, s. 44)

Kuvassa 6.6 osa 1 vastapainetuki, joka tukee kevennyslevyä ja estää kevennyslevyn murtumisen vastapaineiskun aikana. Osa 2 on kevennyslevy, joka murtuu räjähdysaikana ja avaa kevennysalan paineen purulle. Osa 3 on rakenteen tukikehys, jolla kevennyslaite kiinnitetään suojattavaan kohteeseen.

6.2.7 Suuntauslevyt

Räjähdyksen kevennyslaitteilla voidaan suunnata purkautuvat liekit pois suojatusta tilasta. Standardin (SFS-EN 14994) mukaan suuntauslevyjen avulla voidaan ohjata liekin suuntaa liekin tullessa ulos kevennysaukosta. Suuntauslevyjen toimivuutta on testattu vain alle 20 m³ rakenteissa, joten standardin mukaista suunnittelua saa käyttää rajoitetun kokoisissa tiloissa. Suuntauslevyjen käytöllä saadaan lyhennettyä myös liekin pituutta. Suuntauslevy asennetaan 45° – 60° asteen kulmaan kevennysaukkoon nähden. Suuntauslevy tulee asentaa aina riittävän matkan päähän purkausaukosta, jottei se häiritse kevennyslaitteen toimintaa nostamalla räjähdyspainetta suojattavan tilan sisällä. Suuntauslevy tulee asentaa niin, että se kestää voiman, joka purkautuvasta räjähdyksestä siihen kohdistuu. Suuntauslevyn taakse on jätettävä riittävä varoetäisyys, jonne

henkilökunnan pääsy on estettävä laitoksen toiminnan aikana. Kuvassa 6.7 on esitetty suuntauslevyn periaatteellinen toiminta. (SFS-EN 14994.)



Kuva 6.7. Suuntauslevyn periaatteellinen asennuskuva (SFS-EN14994, s.38)

Kuvassa 6.7 osa 1 on suojattava alle 20 m³ rakenne. Osa 2 on räjähdyspaineen kevennyslaite. Osa 3 on suuntauslevy. Etäisyys 4 merkitsee riittävää suojaetäisyyttä liekin suuntaan.

6.2.8 Paineenkevennys rakenteellisin keinoin

Räjähdyspaine voidaan purkaa myös rakenteellisin keinoin seinä- tai kattopintojen kautta. Tietty rakennuksen ulkopinta voidaan heikentää niin, että paineenousu murtaa suunnitellun pinnan ensimmäisenä suojaten näin rakennuksen kantavia osia. Räjähdyspaineen kevennysosat on jaettava mahdollisimman tasaisesti rakennuksen seinä- ja kattopinnoille, jotta kaikki kevennysosat toimisivat samanaikaisesti ja näin räjähdys tuhovoimaa saataisiin lievennettyä. Jos räjähdyspaineen purku toteutetaan heikennetyin rakentein avulla rakennuksen ulkopintojen läpi, tulee ottaa huomioon, ettei esimerkiksi talvella lumi tai jää estä kevennysaukon muodostumista.

6.3 Paineennousun kesto rakenteissa

Räjähdyksessä paine nousee ja mahdollisesti tuhoaa ympärillä olevia rakenteita. Taulukossa 6.1 on esitetty minkälaista vaikutusta painealto voi aiheuttaa erilaisille rakennuksille ja rakenteille (Casal 2008, s.270). Taulukon mukaiset vaurioitumiseen johtavat ylipaineen arvot ovat ulkopuolelta tuleville painealloille ja niitä voidaan käyttää vain suuntaa antavina arvoina sisäpuolisille räjähdyksille.

Taulukko 6.1. Rakennusten ja rakenteiden vaurioituminen paineaallon johdosta (mukaiillen Casal 2008, s.270)

Ylipaine kPa	Vaikutus
0,15	Häiritsevä ääni
0,2	Jännityksessä olevat isot ikkunaruudut saattavat hajota
0,3	Kova pamaus, mahdollinen ikkunavaurio
0,7	Jännityksessä olevat pienet ikkunaruudut voivat hajota
1	Tyypillinen kynnyksarvo, jossa ikkuna voi hajota
2	95% todennäköisyys ettei vakavia vammoja synny ihmisille.
3	Pieniä murtumia voi esiintyä rakennuksen rakenteissa
3,5-7	Ikkunat rikkoontuvat. Ikkunoiden kehyksissä voi esiintyä satunnaisia vahinkoja
5	Pieniä murtumia esiintyy rakennuksen rakenteissa. Vammautumisen riski.
7	Tavallisen säiliön katto murtuu
8	Talot voivat osittain tuhoutua käyttökelvottomaksi
7-15	Aallotetut heikot kattotiilet hajoavat. Aallotettujen alumiini- ja teräspaneelien kiinnitykset nurjahtavat. Puupaneelien kiinnitykset pettävät.
10	Rakennuksen teräksellä kehystetyt rakenteet saattavat vääntyä
15	Talojen seinät ja katot romahtavat osittain. Pysyvän vammautumisen riski.
15-20	Vahvistamattomat betoni- ja harkkoseinät särkyvät
18	Alaraja vakavan rakenteellisen tuhon esiintymiselle. 50% talojen harkkoverhoilusta tuhoutuu
20	Pientä vauriota esiintyy suurissa teollisuusluokan koneissa. Teräsrunkoiset rakennukset vääntyvät ja saattavat siirtyä paikoiltaan
20-28	Teräsrunkoiset rakennukset tuhoutuvat. Öljyn säilytystankit tuhoutuvat
20-40	Suuret puut kaatuvat
30	Kevyiden teollisuusrakennusten pintamateriaalit repeävät.
35	Puiset puhelinpylväät katkeavat. Rakennukset, raudoitettuja betonirakennuksia lukuun ottamatta, tuhoutuvat. Autojen pellit painuvat kasaan
35-40	Putkille suunnitellut ilmasillat siirtyvät ja voivat vääntää putkia.
35-50	Talot tuhoutuvat lähes täydellisesti
40-55	Putkille suunnitellut ilmasillat romahtavat
50	Kuormassa olevat junan vaunut ja rekat kaatuvat. 20-30cm paksuiset tiiliseinät sortuvat
50-55	25-35cm leveät vahvistamattomat tiiliseinät kaatuvat
60	Täydet tavarajunan vaunut tuhoutuvat kokonaan
70	Todennäköisesti rakennukset tuhoutuvat täydellisesti. Suurille koneille ja laitteille aiheutuu suurta tuhoa

Paineaallon tuhovoimaan vaikuttaa paineen arvon lisäksi paineen vaikutuksen kesto rakenteisiin. Tyypillisesti räjähdyspaineen kevennyslaitteet avautuvat 10 kPa ylipaineessa välittömästi, kun paineen arvo saavutetaan, jolloin räjähdyspaineen vaikutuksen aika rakenteita kohtaan saadaan minimoitua.

6.4 Case-esimerkki

Lasketaan standardien mukaisen paineenkevennysaukon koko työssä käytetylle 62,5 m³ kokoiselle kompaktille tilalle, joka on täytetty stoikiometrisessa tilassa olevalla metaani-ilmaseoksella. Kompaktilla tilalla tarkoitetaan tiloja, joiden korkeuden suhde halkaisijaan on pienempi kuin 2 (SFS-EN 14994, 2007, s. 10). Lisäksi arvioidaan räjähdyksestä aiheutuvaa painevaikutusta kevennettävän tilan ulkopuolella, rekyylivoiman suuruutta tilan perustuksille ja liekin vaikutuksia.

6.4.1 Kevennysaukon arviointi

Lasketaan paineenkevennysaukon koko standardin SFS-EN 14994 mukaisesti 62,5 m³ kokoiselle räjähdysvaaralliselle tilalle. Paineenkevennysaukon koon laskemiseksi tarvitaan tiedot reagoivan aineen palamisominaisuuksista, reagoivan aineen tilasta ja tilan koosta. Oletetaan, että metaani-ilmaseos on paikoillaan ja stoikiometrisessa tilassa. Alkutilanteessa kaasuilmeos on normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötila on 27 celsiusastetta. Tila on sisältä avoin, jolloin turbulenssia kasvattavia rakenneosia tai esineitä ei ole tilassa.

Kaasun räjähdysvakio tulisi määrittää mittaamalla räjähdyspaineen nousunopeuden maksimin arvo, mutta tässä työssä käytetään luvussa 4. esitettyä CFD-mallia räjähdysvakioiden määrittämiseen. Luvussa 5. on esitetty, että metaanin räjähdysvakioksi saadaan simuloimalla 105 bar m/s.

Standardin (SFS-EN 14994) mukaan voidaan erilliselle kompaktille tilalle laskea paineen kevennysaukon pinta-ala

$$A = \left\{ \left[\frac{(0,1265 \lg(K_G) - 0,0567)}{P_{red}^{-0,5817}} \right] + \left[\frac{0,1754(P_{stat} - 0,1bar)}{P_{red}^{-0,5722}} \right] \right\} V^{\frac{2}{3}}, \quad (6.7)$$

jossa P_{red} on räjähdyspaineen arvo kevennyksen jälkeen, P_{stat} on kevennyslaitteen staattinen toimintapaine ja V on suojattavan tilan tilavuus. Yhtälön (6.7) käytön reunaehtoina on, että tilassa ei ole käytetty merkittävästi turbulenssia edistäviä rakenneosia. Lisäksi oletetaan, että:

- $K_G \leq 550 \text{ bar m/s}$
- $0,1 \text{ bar} \leq P_{stat} \leq 0,5 \text{ bar}$
- $P_{red} \leq 2 \text{ bar}$
- $P_{red} > P_{stat} + 0,05 \text{ bar}$
- $V \leq 1000 \text{ m}^3$
- $\frac{L}{D} \leq 2$
- normaali-ilmanpaine lähtötilanteessa. (SFS-EN 14994, 2007, s.14.)

Yleinen arvo kevennyslaitteiden staattiselle toimintapaineelle on 0,1 bar ja räjähdyspaineen arvoksi räjähdysen jälkeen voidaan sallia 0,3 bar, Laskemalla yhtälön (6.7) mukaisesti saadaan tilan paineenkevennyksen pinta-alaksi 6,3 m². Standardin mukainen pinta-ala on turvallinen pinta-ala, jolla paine ei nouse määritetyn paineen P_{red} yläpuolelle.

6.4.2 Rekyylivoima

Räjähdyspaineen purussa purkausluukusta purkautuvalla kaasuseoksella on liikemäärää, joka aiheuttaa rekyylin rakenteille. Rekyylivoima vaikuttaa purkaussuunnan vastakkaiseen suuntaan ja purkausluukun vastakkaisen sivun on absorboitava rekyylivoima. Maksimirekyylivoima voidaan arvioida yhtälön (6.8) mukaisesti (SFS-EN 14994).

$$F_{R,max} = 119AP_{red}, \quad (6.8)$$

jossa $F_{R,max}$ (kN) on maksimi rekyylivoima ja A on kevennyspinta-ala. Ottamalla huomioon edellä lasketun kevennysaukon pinta-ala (6,3 m²) ja suurimman paineen arvo tilassa (0,3 bar) voidaan arvioida rekyylivoimaa, jonka arvoksi saadaan nyt 224,91 kN. Rekyylivoima kohdistuu kevennysaukon vastakkaiselle pinta-alalle, joten voima on noin 18 kN/m² kevennysaukon vastakkaiselle seinälle. Tilan rakennesuunnittelussa tulee ottaa huomioon, että rakenteet kestävät tämän rekyylivoiman.

6.4.3 Painevaikutus

Tilan sisällä tapahtuvan räjähdysen synnyttämän paineaallon vaikutuksia kevennysaukon ulkopuolella etäisyydellä r voidaan arvioida kaavan (6.9) mukaisesti.

$$P_{ext} = \frac{1,24P_{red}\left(\sqrt{\frac{A}{r}}\right)^{1,35}}{1 + \left(\frac{\alpha}{56}\right)^2}, \quad (6.9)$$

jossa r on etäisyys kevennysaukolle, P_{ext} on painehuippu kevennyslaitteen ulkopuolella, A on kevennysala ja α on kulma kevennysaukon keskiakselilta ($\alpha = 0^\circ$ purkausaukon suuntaan) (SFS-EN 14994). Yhtälöä voidaan käyttää olettamalla, että:

- $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$
- $p_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$
- $0,1 \text{ bar} < P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}$
- $P_{max} \leq 9 \text{ bar}$
- $K_G \leq 200 \text{ bar m/s}$
- $\frac{L}{D} \leq 2$

- $0,2 \text{ bar} \leq P_{ext} \leq 1,0 \text{ bar}$
- $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$. (SFS-EN 14994.)

Yhtälön (6.9) mukaisesti lasketun painehuipun arvoksi esimerkiksi 5 metrin etäisyydellä kevennysaukosta saadaan 0,43 baria ylipainetta.

6.4.4 Liekin vaikutus

Räjähdyksen synnyttämä liekki purkautuu räjähdysaukosta erityisesti räjähdysaukon normaalin suuntaisesti. Räjähdysaukosta purkautuvan liekin pituutta voidaan arvioida pienille tiloille yhtälön (6.10) mukaisesti.

$$L_F = 5 V^{\frac{1}{3}}, \quad (6.10)$$

jossa L_F on liekin pituus liekin pääsuunnassa. Yhtälöä voidaan käyttää, jos:

- $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 50 \text{ m}^3$
- $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$
- $0,1 \text{ bar} < P_{red} \leq 1,0 \text{ bar}, P_{red} > P_{stat}$
- $P_{max} \leq 9 \text{ bar}$
- $K_G \leq 100 \text{ bar m/s}$
- $\frac{L}{D} < 2$. (SFS-EN 14994.)

Laskemalla yhtälön (6.10) mukaisesti saadaan liekin pituudeksi sen päävaikutussuunnassa noin 19 metriä. Yhtälöä ei kuitenkaan rajoitusehtojen mukaisesti voisi käyttää tilavuudeltaan yli 50 m^3 kokoisen tilan liekin pituuden arvioimiseksi, kun työssä käytetyn esimerkkitalan tilavuus on $62,5 \text{ m}^3$.

6.4.5 Paineenkevennysaukon mitoitusravot

Taulukossa 6.2 on esitetty standardin (SFS-EN 14994) mukaisesti lasketut suunnitteluarvot työssä käytetylle $62,5 \text{ m}^3$ kokoiselle räjähdysvaaralliselle tilalle.

Taulukko 6.2 Standardin mukaiset suunnitteluarvot paineenkevennysaukolle.

Kevennysaukon pinta-ala (m^2)	6,3
Painevaikutus 5 m kevennysluukun ulkopuolella (bar)	0,43
Räjähdyksen aiheuttama rekyylivoima rakenteille (kN)	225
Liekin pituus räjähdysvaarallisen tilan ulkopuolella (m)	19

7. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoite oli laatia selvitys räjähdysvaarallisten tilojen paineenkevennyksestä. Työ alkaa tutustumisesta aiheeseen liittyviin lakeihin, asetuksiin ja standardeihin. Teoriaosassa esitetään räjähdystä hallitsevat yhtälöt ja käsitellään teollisuudessa käytettyjen kaasujen räjähdykseen vaikuttavia palamisominaisuuksia. Tämän jälkeen käydään läpi miten räjähdyspaineen nousunopeutta voidaan simuloida. Lopuksi työssä esitellään standardien mukaisia räjähdyspaineen kevennyslaitteistoja, niiden toimintaperiaatteet ja standardien mukainen paineenkevennysaukon mitoitus.

Teoriaosassa perehdyttiin kaasuräjähdyksen teoriaan ja esitettiin kaasuräjähdystä hallitsevat yhtälöt. Hallitsevat yhtälöt ratkaistiin virtaussimuloinnin avulla. Virtaussimuloinnista esitettiin käytetyt mallit ja menetelmät. Simuloitiin nopea palaminen vakio-tilavuudessa, jossa reagoivina aineina toimivat metaani-ilma- ja propaani-ilmakeos. Metaani ja propaani valittiin reagoiviksi aineiksi kaasujen yleisyyden vuoksi. Lopuksi vertailtiin tässä työssä laskennallisesti simuloituja räjähdysvakion (K_G) arvoja kirjallisuudesta löytyvien korrelaatioiden antamiin arvoihin sekä kokeellisesti määritettyihin arvoihin. Räjähdysvakio valittiin vertailuarvoksi, koska se on keskeinen suunnitteluparametri räjähdysvaarallisten tilojen suunnittelussa.

Korrelaatioiden avulla voidaan räjähdyspaineen nousunopeutta arvioida tilassa, jossa ei ole merkittävästi turbulenssia lisääviä esteitä. Lisäksi tilan tulisi olla lähes kuutiomainen, jotta malleja voisi käyttää luotettavasti. Nämä ehdot rajoittavat korrelaatioiden soveltamista käytännön kohteissa.

Eri menetelmillä lasketut räjähdysvakion arvot vastaavat kohtuullisen hyvin sekä toisiaan että simuloimalla saatuja arvoja työssä käytetyssä esimerkkitilassa. Räjähdysten virtaussimulointia voidaankin pitää hyvänä apuvälineenä räjähdyspaineen nousunopeuden. Tietokoneiden laskentanopeuksien kasvaessa voidaan jopa simuloida esimerkiksi räjähdysvaarallisessa tilassa olevat esteet, jotka voimistavat turbulenssia, joka taas nostaa räjähdyspaineen nousunopeutta. CFD-simuloinnin haittapuolena on kuitenkin laskentaohjelmien hintavuus ja se, että simuloijalta vaaditaan suurta kokemusta ja ammattitaitoa, jotta tuloksista saadaan luotettavia.

Standardien pohjalta on luotu korrelaatioita, joiden avulla voidaan arvioida esimerkiksi paineenkevennysluukun kokoa ja muita räjähdykseen liittyviä turvallisuustekijöitä, kuten liekin pituutta paineenkevennysluukusta. Standardien mukaisia korrelaatioita käytettäessä tulee huomioda, että korrelaatioita ei saa käyttää missä tahansa tilanteessa, vaan korrelaatioilla on rajatut käyttöalueensa. Korrelaatioiden käyttöalue varmistaa, että esimerkiksi paineenkevennysalasta tulee tarpeeksi suuri. Toisaalta standardien mukaiset korrelaatiot voivat myös yliarvioida suunnitteluparametreja, jolloin mahdollisesti

ylimitoitettut paineenkevennysluukut nostavat paineenkevennyksen kustannuksia turhaan.

Jatkotutkimuksena työlle voitaisiin resurssien mahdollistaessa suorittaa todellisen mittakaavan räjähdystestejä. CFD-mallia voitaisiin kehittää niin, että simuloinnilla saataisiin mittausten kanssa yhteneviä tuloksia ja simulointimallin käyttöön saataisiin varmuutta.

8. LÄHTEET

Casal, J. (2008). Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Amsterdam;London;: Elsevier.

Bartok, W., & Sarofim, A. F. (1991). Fossil fuel combustion: A source book. New York, NY: Wiley.

Bradley, D., Mitcheson, A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels, *Combustion and Flame*, Volume 26, (1976), Pages 201-217, ISSN 0010-2180, [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(76\)90072-9](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(76)90072-9).

Dahoe, A.E. Tutorial on deflagrations and detonations, [Verkkodokumentti], Saatavilla: http://www.hysafe.org/science/eAcademy/JSSFCH/JSSFCH2011/DahoeAE_TutorialOnDeflagrationsAndDetonations.pdf, viitattu: 27.02.2017

2014/34/EU Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettuja laitteita ja suojajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta. Annettu 26.2.2014

1999/92/EY Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi. Annettu 16.12.1999.

Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr., J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. Watts Jr, John M. Wieczorek, C. J. (2016;2015;). *SFPE handbook of fire protection engineering* (Fifth;5;5th; ed.). DE: Springer Verlag.

Jo, Y., & Park, K. (2004). Minimum amount of flammable gas for explosion within a confined space. *Process Safety Progress*, 23(4), 321-329. doi:10.1002/prs.10042

Kondo, S., Urano, Y., Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., & Sekiya, A. (2006). Flammability limits of multi-fluorinated compounds. *Fire Safety Journal*, 41(1), 46-56. doi:10.1016/j.firesaf.2005.08.002

Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 2005/390. Annettu 3.6.2005.

Laki räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettujen laitteiden ja suojausjärjestelmien vaatimustenmukaisuudesta 1139/2016. Julkaistu Helsingissä: 19.12.2016

Lee, J. H. S. (2016). *The gas dynamics of explosions*. New York: Cambridge University Press

- Lee, J. H. S. (2008). *The detonation phenomenon*. GB: Cambridge University Press.
- Luijten, C. C. M., Doosje, E., & de Goey, L. P. H. (2009). Accurate analytical models for fractional pressure rise in constant volume combustion. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), 1213-1222. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.020
- M. Metghalchi, J.C. Keck, Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure, *Combustion and Flame*, Volume 38, 1980, Pages 143-154, ISSN 0010-2180, [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90046-2](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(80)90046-2).
- Molkov, V., Dobashi, R., Suzuki, M., & Hirano, T. (2000). Venting of deflagrations: Hydrocarbon-air and hydrogen-air systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3), 397-409. doi:10.1016/S0950-4230(99)00063-7
- Nagy, J., Seiler, E.C., Conn J.W., Verakis, H.C., (1971). *Explosion Development in Closed Vessels*. U. S. Dept. of Interior, Bureau of Mines. RI 7507. 50 s.
- NFPA 68. 2013. *Standard on explosion protection by deflagration venting*. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 80 s.
- Ogle, R. A. (1999). Explosion hazard analysis for an enclosure partially filled with a flammable gas. *Process Safety Progress*, 18(3), 170-177. doi:10.1002/prs.680180310
- Outinen, H., Salmi, T., Vulli, P., (2007). *Lujuusopin perusteet*. Pressus Oy.
- Poinsot, T., & Veynante, D. (2005). *Theoretical and numerical combustion* (2nd ed.). Philadelphia: Edwards. 522 s.
- SFS-EN 14460. (2006). *Räjähdyksenkestävät laitteet*. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu: 18.12.2006
- SFS-EN 14797. (2007). *Räjähdyksipaineen kevennyslaitteet*. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu: 20.8.2007
- SFS-EN 14994. (2007). *Kaasuräjähdyksiä keventävät suojausjärjestelmät*. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu: 23.8.2007.
- Strehlow, R. A. (1984). *Combustion fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (2015). saatavilla: http://www.tukes.fi/Tiedostot/vaaralliset_aineet/esitteet_ja_opaat/ATEX_opas.pdf, viitattu: 18.5.2017
- Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista 856/2012. Annettu 20.12.2012.
- Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta 576/2003. Annettu 18.6.2003.

Valtioneuvoston asetus räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäväksi tarkoitettujen laitteiden ja suojausjärjestelmien vaatimustenmukaisuudesta 1439/2016. Julkaistu 30.12.2016

Van den Bulck, E. (2005). Closed algebraic expressions for the adiabatic limit value of the explosion constant in closed volume combustion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(1), 35-42. doi:10.1016/j.jlp.2004.10.004

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Harlow: Pearson/Prentice Hall.

