

LAPPEENRANNANTEKNILLINEN YLIOPISTO  
Kemiantekniikan osasto  
BJ20A0450 Kandidaatintyö ja seminaari

## **Kymmenen suuronnettomuuden analysointi ja pääsyyt**

Tekijä:  
Anssi Rajala

0262795, Ke4

03.03.2009

## SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	4
2	Flixborough .....	4
	2.1 Yritys .....	5
	2.1.1 Yrityksen johto .....	5
	2.2 Tehdasalue .....	6
	2.3 Prosessi .....	6
	2.4 Onnettomuuden kulku .....	7
	2.4.1 Räjähdystapahtuma.....	8
	2.5 Onnettomuustutkinta.....	9
	2.6 Onnettomuuden seuraukset.....	10
	2.7 Päätelmät.....	11
3	Seveso .....	12
	3.1 Tehdasalue .....	12
	3.2 Prosessi .....	13
	3.3 Onnettomuuden kulku .....	14
	3.3.1 Vuoto .....	14
	3.3.2 Seuraukset.....	15
	3.4 Päätelmät.....	15
	3.5 Syitä onnettomuuteen .....	15
4	Mexico City .....	16
	4.1 Terminaalialue .....	17
	4.2 Onnettomuuden kulku .....	17
	4.2.1 Vuoto ja räjähdys.....	18
	4.2.2 BLEVE .....	18
	4.3 Onnettomuuden jälkeen .....	19
	4.4 Syitä.....	19
5	Bhopal.....	20
	5.1 Yritys .....	21
	5.2 Tehdasalue .....	21
	5.3 Prosessi .....	22
	5.4 Tapahtumat ennen onnettomuutta.....	23
	5.5 Onnettomuuden kulku .....	24

5.5.1	Altistus.....	25
5.6	Tutkimus.....	26
5.7	Syitä.....	27
6	Pasadena, Texas.....	28
6.1	Tehdasalue.....	28
6.2	Prosessi.....	28
6.3	Onnettomuuden kulku.....	29
6.4	Syitä.....	30
7	AvestaPolarit Stainless Oy (nykyinen Outokumpu Stainless Oy).....	31
7.1	Tehdasalue.....	31
7.2	Prosessi.....	31
7.3	Onnettomuuden kulku.....	32
7.3.1	Räjähdyks.....	33
7.4	Tutkimus.....	34
7.5	Syöttömissyyt.....	34
7.6	Päätelmät.....	35
8	Danisco, Kotka.....	35
8.1	Tehdas.....	35
8.2	Prosessi.....	36
8.3	Tapahtumat ennen onnettomuutta.....	36
8.4	Onnettomuuden kulku.....	38
8.4.1	Räjähdyks.....	38
8.5	Syitä.....	39
8.6	Muita syytekijöitä.....	40
8.6.1	Johtaminen.....	40
8.6.2	Tiedonkulku.....	40
9	Bp Products, Texas.....	41
9.1	Tehdasalue.....	41
9.2	Prosessi.....	42
9.3	Onnettomuuden kulku.....	42
9.4	Syitä.....	44
10	Finnish Chemicals Oy, Äetsä.....	44
10.1	Tehdasalue.....	45
10.2	Prosessi.....	45

10.3	Tapahtumat ennen onnettomuutta.....	46
10.4	Onnettomuuden kulku .....	47
10.4.1	Räjähdyks .....	47
10.5	Seurauksia.....	48
10.6	Syitä.....	48
10.6.1	Onnettomuutta edistäneet tapahtumat.....	49
11	Ekokem, Hanko .....	49
11.1	Tehdasalue .....	50
11.2	Prosessi .....	50
11.3	Onnettomuuden kulku .....	50
11.3.1	Räjähdyks .....	52
11.4	Syitä.....	52
11.4.1	Johtaminen.....	52
11.4.2	Tekniset tekijät.....	53
11.4.3	Toiminta.....	53
12	Yhteenveto.....	54
13	Lähteet .....	56

## 1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä käyn läpi kymmenen teollista suuronnettomuutta. Lähteinä olen käyttänyt erilaisia onnettomuustutkintaraportteja, joiden perusteella käyn läpi tapahtumien kulun ja tapahtumaan vaikuttaneet päätekijät.

Työtä suunniteltaessa pyrin valitsemaan mahdollisimman erilaisia onnettomuuksia eri aikakausilta, sekä valitsin mukaan myös muutamia merkittäviä tapahtumia, jotka ovat vaikuttaneet turvallisuusajattelun kehittymiseen.

Turvallisuusajattelu on nykypäivänä merkittävässä osassa teollisuustoimintaa. Teollisuusyhtiöt ovat tarkkoja maineestaan turvallisina sekä ympäristöystävällisinä yhtiöinä, jonka takia turvallisuusajattelu on nykyisin yhtiöiden tärkeimpiä asioita kannattavuuden lisäksi.

Tässä kandidaatintyössä olen käsitellyt onnettomuustapahtumat kronologisessa aikajärjestyksessä. Aivan uusimmat tapaukset ovat niin tuoreita, ettei niistä ole yhtä kattavia tutkintaraportteja olemassa, kuin vanhimmista tapauksista.

## 2 Flixborough

Lauantaina 1.6.1974 tapahtui kaasupilviräjähdyks Nypron tehtaalla Flixboroughissa, Englannissa. Räjähdyksessä menehtyi tehdasalueelta 28 työntekijää ja 36 muuta loukkaantui. Jos räjähdys olisi tapahtunut tavallisena arkityöpäivänä, olisi uhrien määrä ollut moninkertainen. Tehdasalueen ulkopuolella vahingot olivat laajat, mutta kukaan ulkopuolinen ei menehtynyt. [1]

Viranomaisten tietoon tuli 53 loukkaantunutta, jonka lisäksi sadat muut kärsivät pienempiä vahinkoja, joita ei tilastoitu. Omaisuusvahinkoja tapahtui laajalla alueella; ainakin 1821 taloa sekä 167 kauppaa ja tehdasta kärsivät vähintään lieviä vahinkoja. [1]

Flixboroughin räjähdys oli vakavin onnettomuus Iso-Britannian kemianteollisuudessa moneen vuoteen. Se herätti teollisuuden ja kansan

tietoiseksi suuronnettomuusvaaroista, jotka liittyvät suuriin kemianteollisuuden tehtaisiin. Flixboroughin ja seuraavana käsiteltävän Seveson onnettomuuden jälkeen käynnistyivät turvallisuuden parantamiseen tähtäävät tutkimukset ja toimenpiteet, joilla oli suuri merkitys Iso-Britannian teollisuuden turvallisuuden parantamiseen ja onnettomuuksien estämiseen. Myös vaarallisten tehtaiden julkinen valvonta tehostui näiden tapahtumien jälkeen. [1]

## 2.1 Yritys

Tehdasalue rakennettiin 1938, jonne Nypro perustettiin 1964. Vuodesta 1967 tehtaassa valmistettiin nylonin valmistuksessa käytettyä kaprolaktaamia. Valmistusprosessin alussa fenolin hydrauksella valmistettiin sykloheksanonia, jonka valmistuksessa se oli ainoa Iso-Britanniassa. [1]

Kaprolaktaamin vuosittaista tuotantokapasiteettia nostettiin 20 000t:sta 70 000t:iin vuonna 1972. Muutoksen myötä sykloheksanonin valmistuksessa sykloheksaanin hapetus korvasi fenolin hydrauksen. Tämä muutos tarkoitti turvallisuuden kannalta sitä, että sykloheksaani on verrattavissa bensiiniin monilta ominaisuuksiltaan, jolloin varastointiin oli kiinnitettävä huomiota. Suuret määrät sykloheksaania oli kierrätettävä reaktoreiden läpi 155 °C lämpötilassa ja lähes 9bar paineessa, jonka vuoksi kaikki vuodot laitoksessa olivat vaaratilanteita. [1]

### 2.1.1 Yrityksen johto

Flixboroughin tehtaalla ei ollut onnettomuuden aikana käyttöinsinööriä, entisen lähdeyttä ei uutta ollut vielä nimetty. Käyttöinsinöörin puuttuessa huoltoinsinööri toimi hänen sijaisenaan oman toimensa ohessa. Onnettomuustutkinnan mukaan huoltoinsinöörillä ei ollut edellytyksiä toimia käyttöinsinöörin asemassa, huoltoinsinöörillä ei ollut tarvittavaa tietotaitoa eikä kokemusta tehdä käyttöinsinöörille kuuluvia päätöksiä. [1]

## 2.2 Tehdasalue

Flixboroughin tehdas sijaitsee peltojen ympäröimänä, tasaisella ja matalalla olevalla maa-alueella, Trent -joen itäisellä pengeralueella. Lähimmät kylät ovat alle kilometrin päässä ja Scunthropen kaupunki sijaitsee alle viiden kilometrin päässä. Asukastiheys on alueella erittäin alhainen. Tehdasalueella oli myös happo- ja vetytehdas sekä suuri ammoniakksäiliö. [1]

## 2.3 Prosessi

Sykloheksaaniprosessi on eksoterminen prosessi ja se sisälsi kuusi reaktoria sarjassa. Reaktoreissa sykloheksaani hapetettiin sykloheksanoniksi sekä sykloheksanoliksi katalyytin avulla. Reaktorit oli valmistettu 0,5 tuuman valantateräksestä, joka oli pinnoitettu sisältä päin 0,125 tuuman ruostumattomalla teräksellä. [1]

Reaktorien syöttö oli sekoitus uutta sekä kierrätettyä sykloheksaania. Tuote sisälsi edelleen noin 94 % sykloheksaania. Nestemäiset reaktantit virtasivat reaktorista toiseen painovoiman avulla. Myöhemmissä vaiheissa reaktiotuote tislattiin, jotta reagoimaton sykloheksaani saatiin kierrätettyä reaktoriin sykloheksanonin ja sykloheksanolin kanssa, jolloin saatiin tuotteena kaprolaktaamia. [1]

Reaktorin syöttö sekä itse reaktio lämmitettiin höyrylämmönvaihtimella. Höyryn virtausta lämmönvaihtimeen säädettiin automaattisella venttiilillä. Prosessin käynnistyksessä tarvittava suurempi lämpömäärä saatiin aikaan tämän automaattiventtiilin kierrolla. Ylimääräisen lämmön poisto reaktiosta tapahtui höyrystämällä osa nestemäisestä sykloheksaanista. Poistokaasujen mukana poistui myös hieman typpeä, jossa oli reagoimatonta happea. [1]

Poistokaasut lämmittivät lämmönvaihtimen syöttöä, jonka jälkeen se puhdistettiin ja jäädytettiin. Tämän jälkeen poistokaasusta kondensoitiin sykloheksaani absorberissa, josta se ohjattiin automaattiventtiilillä soihtuihin poltettavaksi. [1]

Reaktorin olosuhteita kontrolloitiin typen avulla, jota oli varastoituna korkeassa paineessa. Reaktorin painetta kontrolloitiin poistokaasun poistoventtiilin avulla. Varoventtiilit oli säädetty aukeamaan 10,8 bar paineessa. [1]

Reaktori voitiin pysäyttää ajastimella halutuun väliajoin estämällä hapen pääsy reaktoriin ja lisäämällä typpeä, mikäli poistokaasussa oli liikaa happea. Tämä automaattinen pysäytysjärjestelmä voitiin ottaa pois käytöstä asettamalla ajastin nolnaan. [1]

## 2.4 Onnettomuuden kulku

Maaliskuun 27. päivänä löydettiin viidennestä reaktorista sykloheksaanivuoto. Ulommassa pehmeässä teräksessä oli pystysuuntainen halkeama ja sykloheksaanin vuodosta pääteltiin myös sisemmässä teräksessä olevan halkeama. Löydöksen vuoksi koko laitos ajettiin alas, jotta halkeamat saatiin tutkittua kunnolla. [1]

Seuraavana aamuna aloitetuissa tarkastuksissa havaittiin halkeaman laajentuneen melkein kahteen metriin, jolloin tilanne todettiin vakavaksi ja toimista päätettiin kokouksessa. Kokouksessa päätettiin poistaa viides reaktori kiertämällä se. Prosessia muutettiin yhdistämällä neljäs reaktori suoraan kuudenteen reaktoriin, jolloin tuotantoa päätettiin jatkaa. [1]

Reaktorin syötön suuaukko oli 71 cm, mutta tehtaalta löytyi ainoastaan halkaisijaltaan 51 cm olevaa sopivaa putkea, jolloin putkien kiinnityksiin jouduttiin tekemään sovitepalat. Reaktoreiden kiinnityslaipat olivat eri korkeudella, jolloin asennuksessa jouduttiin tukemaan yhdistävää putkea, joka tehtiin kolmesta eri osasta. [1]

Laskelmilla varmistettiin, että putken halkaisija riittää tarvittavan virtauksen saamiseksi ja että se kestää riittävän paineen suorana putkenä. Laskelmissa ei otettu huomioon putken mutkittelevaa muotoa, eikä reaktorin haitariliitännän kestävyyttä tarkastettu laskelmilla. Myöskään mitään piirroksia ei tehty toteutettavasta ohitusputkesta. [1]

Ohitusrakennelma tuettiin telinerakenteella, jonka tarkoitus oli tukea putkea sekä estää haitariliitosta taittumasta asennuksen aikana. Se ei ollut riittävä tuki pysyväksi ratkaisuksi prosessin käyttöä varten. [1]

Ennen ohituksen toteutusta ei sen paineen kestoa testattu lainkaan. Paineenkesto testattiin asennuksen jälkeen 9 bar paineella, mutta ei turvaventtiilin 11 bar aukeamispainessa. Testi suoritettiin pneumaattisesti, ei hydraulisesti. [1]

Toteutettujen muutosten jälkeen tehdas käynnistettiin uudelleen ja ohitus toimi moitteettomasti. Typen kulutus oli noussut epätavallisen korkeaksi, jota alettiin tutkia onnettomuuden tapahtumisen aikoihin. [1]

Maaliskuun 29. päivänä huomattiin yhden tankin näkölasin eristysventtiilin vuotavan, jonka vuoksi tehdas ajettiin alas, jotta vuoto saatiin korjatuksi. Alasajon jälkeen tehdas saatiin käyntiin uudestaan kesäkuun 1. päivän aamuna. [1]

Tarkkaa tapahtuman kulkua ei tiedetä, mutta ratkaisevana pidetään reaktoreiden hieman normaalia korkeampaa käyttöpainetta. Paine nousi äkkinäisesti 8,5 bar paineeseen lämpötilan ollessa ensimmäisessä reaktorissa vain 110 °C. Kun myöhemmin samana aamuna lämpötila reaktoreissa nousi normaaliin 155 °C, oli paine noussut jo yli 9,1 bar paineeseen. [1]

Reaktoreiden paineensäätö voitiin normaalisti hoitaa poistokaasujen avulla, mutta sillä tavalla menetettiin huomattavia määriä typpeä. Pian prosessin käynnistyksen jälkeen huomattiin typpeä olevan riittämättömästi, jotta hapetus olisi voitu aloittaa, eikä täydennystä saataisi ennen puoltayötä. Tässä tapauksessa typen säästö johtaisi paineen alentamiseen ilmauksella. [1]

#### 2.4.1 Räjähdystapahtuma

Iltapäivän aikana ohitusputki halkesi. Lähistöllä 20 cm putkessa ollut tulipalo saattoi edesauttaa tapahtumaa, joka johti suuren määrän sykloheksaania

purkautumiseen. Sykloheksaani muodosti syttymisherjän kaasupilven, joka löysi sytytyslähteen. Noin klo 16.53 tapahtui massiivinen kaasupilviräjähdyks. [1]

Räjähdyks aiheutti suuria vahinkoja ja sytytti useita tulipaloja. Se tuhosi sykloheksaanitehtaan lisäksi lukuisia muita alueella olleita tehtaita. Suuri osa syttyneistä tulipaloista oli varastoalueella. [1]

Räjähdyksen paineaalto rikkoi valvomon ikkunat ja romahtutti sen katon. Kaikista 28 menehtyneestä uhrista valvomossa oli 18. He saivat vammoja lentävistä lasinpaloista ja romahtaneesta katosta. Kukaan ei päässyt pakoont valvomosta. Toimistorakennus tuhoutui paineaallon vaikutuksesta, lauantai iltapäivänä alue oli onneksi tyhjä. Tulipalot kestivät tehdasalueella useita päiviä, vielä 10 päivän jälkeenkin tulipalot vaikeuttivat pelastustöitä alueella. Suuri ammoniakksäiliö sai pienen vuodon, mutta se ei ollut vaarallinen. [1]

## 2.5 Onnettomuustutkinta

Tutkimukset aloitettiin välittömästi eri tahojen toimesta. Joitakin mahdollisia syitä ohituksen pettämiseen alustavasti olivat 51 cm putken pettäminen paineen kasvusta johtuen, onnettomuutta edeltänyt 20 cm putken pettäminen, onnettomuutta edeltänyt jonkin muun osan pettäminen tai räjähdys reaktorien ilmalinjassa. [1]

Halkaisijaltaan 51 cm putken paineen nousuun arveltiin olevan useita mahdollisia syitä: korkeapaineista tyyppiä on saattanut päästä systeemiin laitteiston vian vuoksi, vettä on saattanut päästä systeemiin, systeemin lämpötila on noussut liikaa lämmönvaihtimessa, höyryvuoto lämmönvaihtimessa, prosessissa syntyvien peroksidien räjähdys tai ilman aiheuttama räjähdys systeemissä. [1]

Onnettomuuden syyksi kerrottiin massiivisen syttymisherjän kaasupilven muodostumisen sykloheksaanista, joka vuoti tehtaasta 155 °C lämpötilassa ja ainakin 8,8 bar paineessa, joka sai sytykkeen räjähdykseen asti. Tutkimuksessa oltiin yksimielisiä siitä, että räjähdyksessä mukana ollut sykloheksaanivuoto aiheutui ohitusputken asennuksesta. Erimielisiä oltiin vain siitä, että aiheutuiko

mekaaninen vika itse asennuksesta, vai jostain muusta ulkopuolisesta vaikutuksesta. [1]

Lopullisesti syyksi todettiin jo aikaisemmin mainittu, halkaisijaltaan 51 cm ohitusputken pettäminen sisäisen paineen ja lämpötilaolojen vuoksi, joka aiheutti vuodon putkeen. Tutkimuksissa selvisi ohitusputken sulaneen alemmassa mutkassa ja, että haitariliitos oli totaalaisesti muuttanut muotoaan. [1]

Leikkausvoimat olivat liian kovia ohitusputken rakenteelle, vääntömomentti oli suurimmillaan alimmassa mutkassa. Putken pettäminen on voinut tapahtua kahdella tavalla: leikkaavat voimat ovat voineet aiheuttaa haitariliitoksen pettämisen tai momenttivoimat ovat voineet vääntää alimman mutkan rikki. Kuten aiemmin mainittiin, on ohitusputken asennusvaiheessa jätetty nämä voimat huomioimatta lujuuslaskelmissa. [1]

Tutkimuksessa todettiin reaktoreissa olleen maksimissaan 40t sykloheksaania, ennen räjähdystä oli tästä määrästä 30t purkautunut ulos kahdesta reaktorista. Reaktoreiden aukot olivat erikorkeudella, jolloin niistä purkautunut sykloheksaani muodosti turbulentin impulssisuihkun toisiaan kohti. Tästä johtuen muodostui erittäin räjähdysherkkä seos. [1]

## 2.6 Onnettomuuden seuraukset

Flixboroughin onnettomuudesta voitiin oppia suunnattomasti. Oppimisen aihetta saatiin sekä johtamismenetelmistä, että teknisistä ratkaisuista ja myös suunnittelusta sekä toteutuksesta. Seuraavassa mainitsen muutamia asioita, jotka nousivat esille onnettomuuden jälkeen. [1]

Flixboroughin onnettomuus kasvatti tietoutta kemianteollisuuden vaaroista sekä herätti kysymyksen julkisen valvonnan tarpeesta ja varsinkin sen puutteellisuudesta. Tehdasalueen sijoittamisen merkitys huomattiin onnettomuuden jälkeen, mikäli tehdas olisi ollut lähempänä asutusta, olisi uhrien määrä noussut moninkertaiseksi. [1]

Onnettomuuden jälkeen huomattiin suuria puutteita varastoitavien aineiden ilmoitusvelvollisuudessa, jolloin viranomaisten on hankala suunnitella toimintoja onnettomuuden sattuessa. [1]

Johtamismenetelmät todettiin puutteellisiksi, jolloin suoritettun ohitusputken asennuksen valvonta ja toteutus jäi heikoksi. Suuri osa tästä johtui käyttöinsinöörin puutteesta. [1]

Valvomon ja muiden rakennusten sijoittamisessa sekä suunnittelussa todettiin puutteita, jotka johtivat suunnittelun muutokseen tulevaisuudessa. Myös valvomon laitteiden ergonomiasta otettiin oppia tulevaisuutta varten. [1]

## 2.7 Päätelmät

Flixboroughin onnettomuudesta otettiin siis oppia monella eri tavalla. Yhtä syytä tämän onnettomuuden tapahtumiseen ei voida nimetä. [1]

Ensimmäisenä tulee mieleen käyttöinsinöörin puute tehtaassa. Käyttöinsinööri on se henkilö, joka tuntee tehtaan toiminnan läpikotaisin ja tietää miten vikatilanteissa tulee toimia. Käyttöinsinöörin toimia ei voi hoitaa kukaan muu kuin siihen toimeen koulutettu henkilö. Käyttöinsinööri olisi omalla kokemuksellaan ja tietotaidollaan voinut keksiä paremman ratkaisun alkuperäiseen ongelmaan, halkeaman löytämiseen viidennestä reaktorista.

Ohitusputken asennuksessa tapahtui virhe laskettaessa putken kestävyyttä käyttöpaineessa. Laskelmissa ei otettu huomioon mahdollista paineen ylitystä turvaventtiilin aukeamiseen asti. Lisäksi laskelmissa käytettiin suoralle putkelle tarkoitettua kaavaa, jolloin jäi huomioimatta ohitusputkessa ollut mutka, joka aiheuttaa paineenkasvua. [1]

Pienemmän putken sovittaminen halkaisijaltaan isompaan putkeen ei tapahtunut parhaalla mahdollisella tavalla. Haitariliitos ei kestänyt paine- ja lämpötilaolosuhteita. Suurin tekijä tässä oli kiire: ei ollut aikaa tai halua odottaa oikean kokoista putkea. Tässäkin oli varmasti osasyynä käyttöinsinöörin puuttuminen. [1]

Ohitusputkeen tullut mutka johtui neljännen ja kuudennen reaktorin korkeuserosta. Tätä korkeuseroa ei olisi ollut, mikäli prosessiin olisi alun perin suunniteltu pumppuja käytettäväksi liuoksen siirtämiseen reaktorista seuraavaan. Tästä olisi seurannut myös se, että prosessissa olisi voitu käyttää halkaisijaltaan pienempiä putkia. [1]

### 3 Seveso

Heinäkuun 10. päivänä vuonna 1976 Icmesa Chemical Companyn tehtaalla tapahtui suuronnettomuus, joka on vaikuttanut suuresti turvallisuusajattelun kehittymiseen nykypäivänä. Tämän onnettomuuden seurauksena on syntynyt nykyisin käytössä oleva SEVESO -direktiivi. [1]

Tehtaalla tapahtuneen reaktorin vuodon seurauksena vapautui ilmaan muiden kemikaalien mukana TCDD:tä, joka on yksi maailman myrkyllisimmistä kemikaaleista. TCDD pääsee elimistöön ihokosketuksessa ja hengityksen tai ravinnon kautta. Pääoire TCDD altistuksen jälkeen on aknen tapainen ihottuma, joka aiheutuu kemikaaleista. Pieni osa tällaisen iho-oireen saaneista parantuu vuoden sisällä, mutta useimmat tapaukset voivat kestää useita vuosia. Muita oireita ovat mm. palovammat sekä vauriot maksassa tai munuaisissa. [1]

Onnettomuuden jälkeen syntyi suuri epätietoisuus tapahtuneesta, sillä yhtiön ja viranomaisten välinen tiedonkulku ei toiminut, eikä viranomaisilla ollut kokemusta vastaavista tilanteista. Seuraavien päivien aikana saastuneella alueella olleet eläimet kuolivat ja ihmiset tulivat sairaiksi, jonka seurauksena aloitettiin myöhästynyt ja puutteellinen evakuointi. Evakuoinnin ansiosta ihmisiä ei menehtynyt, mutta suuri määrä raskaana olleita naisia sai keskenmenon. [1]

#### 3.1 Tehdasalue

Icmesan tehdasalue sijaitsi keskellä peltoja ja metsää. Se on lähellä Seveson 17 000 asukkaan kaupunkia, joka on noin 25 kilometrin päässä Milanon suurkaupungista. [1]

### 3.2 Prosessi

Tehdas, jossa onnettomuus sattui, valmisti 2, 4, 5-trikloorifenolia(TCP) panosprosessina. Tehdas oli ehtinyt tuottaa TCP:tä vuosina 1970–1976 noin 370t. [1]

Reaktio tapahtui kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa muodostettiin 2, 4, 5-trikloorifenolieetteriä 170–180 °C lämpötilassa, natriumhydroksidin, eteeniglykoli liuottimessa, läsnä ollessa. Reaktioliuos sisälsi myös ksyleeniä, joka poistaa vettä aseptrooppisessa tislauksessa. Ensimmäisen vaiheen päätti etyleeniglykolin 50 %:nen poistaminen tislauksella ja reaktion lämpötilan laskemisella 50–60 °C:een vettä lisäämällä. Toisessa vaiheessa natriumtrikloorifenolieetteri happamoitiin suolahapolla TCP:ksi, joka puhdistettiin tislauksella. [1]

Käytetty prosessi oli muunnos laajalti käytetystä menetelmästä. Perinteisessä prosessissa käytettiin etyleeniglykolin tilalla metanolia ja käyttöpaine oli 20 bar. [1]

Käytetyssä reaktiossa ei voitu välttyä sivutuotteena syntyvästä TCDD:ltä. Alle 180 °C lämpötilassa sivutuotetta ei syntynyt yli 1ppm TCP:tä, mutta lämmitystä jatkamalla 230–260 °C:een asti, sivutuotteen määrä saattoi kasvaa tuhatkertaiseksi. Reaktiossa syntyvä TCDD saatiin poistettua lopputuotteesta lähes täysin, jolloin TCP:en jäi sivutuotetta korkeintaan 10 ppb. [1]

Reaktori oli 13 875 litran säiliö, jossa oli höyryvaippa ja sekoitin. Höyryvaipassa voitiin käyttää höyryä 12 bar paineessa. Höyryn kylläisyys lämpötila 12 bar paineessa on 188 °C. Reaktorin säätimet olivat alkeelliset ja lämmitystä ei voitu säätää automaattisesti. Reaktorissa oli varokalvo, joka oli asetettu 3,5 bar paineeseen. Varokalvon ilmaus tapahtui suoraan ulkoilmaan. Sen tehtävä oli estää ylipaineen syntyminen paineilmaa käytettäessä. Vaaralliset jäännöstuotteet poltettiin 800–1000 °C:ssa. [1]

### 3.3 Onnettomuuden kulku

Prosessi käynnistettiin klo 16.00 perjantaina, heinäkuun 9. päivänä. Reaktoriin panostettiin 2000 kg TCB:tä, 1050 kg natriumhydroksidia, 3300 kg etyleeniglykolia ja 600 kg ksyleeniä. Kun reaktio oli edennyt hetken, poistettiin osa etyleeniglykolista tislaamalla, mutta normaalin 50 % osuuden sijasta poistettiin vain 15 %. [1]

Tislaus lopetettiin klo 5.00 heinäkuun 10. päivänä ja lämmitys keskeytettiin, mutta reaktiomassan jäähtymykseen ei lisätty vettä. Reaktorin lämpötilaa ei laskettu 50–60 °C:een, lämpötilan seuranta katkaistiin 158 °C:een, joten se on viimeinen lämpötila, josta on varmaa tietoa. Työvuoro päättyi klo 6.00 ja tehdas suljettiin viikonloppua varten. Reaktorin sekoitin oli pysäytetty, mutta massan jäähtyttämiseksi ei ollut tehty mitään. Viikonlopun aikana, höyryvarasto reaktoria varten yllilämmittyi, koska sitä ei käytetty reaktorin ollessa liian lämmin. Höyryn lämpötila oli jo 300 °C. [1]

#### 3.3.1 Vuoto

Heinäkuun 10. päivänä klo 12.37 reaktorin varokalvo repeytyi, josta syntyi viheltävä ääni, jonka kunnossapidon henkilökunta kuuli. He näkivät kaasun purkautuvan repeämästä ylöspäin ja muodostavan tiheän, huomattavan korkean, pilvimäisen muodostelman. Vuoto kesti noin 20 minuuttia. [1]

Vihellyksen kuulleet kunnossapidon työntekijät tiesivät jonkun olevan vinossa, ja he juoksivat höyrykattilahuoneeseen käynnistääkseen suuren sammutusvesipumpun, jonka jälkeen he hakivat suojavarusteet. He lähestyivät paikkaa, jossa onnettomuus sattui ja tunsivat lämmön, joka hehkui reaktorista. Paikalle kutsuttu teknillinen johtaja saapui klo 13.10, kun vuoto oli jo vähentynyt. Noin tunnin päästä vuodon alkamisesta kunnossapidon työntekijät pystyivät päästämään jäähtytysvettä reaktoriin. [1]

### 3.3.2 Seuraukset

Kemikaalivuoto saastutti tehtaan lähialueet TCDD:llä jopa yli 14 km<sup>2</sup> alueelta. Kunnallinen terveysturvaviranomainen oli lomalla maalaiskylässä, jossa hänellä ei ollut puhelinta, eikä julkista varoitusta suostuttu tekemään ilman terveysturvaviranomaisen lupaa. Vasta seuraavana päivänä saatiin tieto onnettomuudesta leviämään lähialueen asukkaille, kun tehtaan johto otti yhteyttä Seveson pormestariin, joka laittoi tiedon eteenpäin. [1]

Evakuointi saatiin alulle vasta kahden viikon kuluttua onnettomuudesta. Lähialueelta evakuoitiin 733 ihmistä ja hieman kauempana aloitettiin yli 5000 ihmisen lääketieteellinen seuranta, jotka saivat jäädä koteihinsa. [1]

### 3.4 Päätelmät

Tästä onnettomuudesta opittiin jälleen paljon. Osa opeista oli hyvin samantyyppisiä, mitä opittiin Flixboroughin onnettomuudesta. Seuraavassa kerron muutamia esimerkkejä.

Onnettomuuden seurauksena syntyi SEVESO -direktiivi, joka koskee tietystä teollisesta toiminnasta aiheutuvien suuronnettomuuksien ehkäisemistä sekä niiden ihmisiin ja ympäristöön kohdistuvien seurausten rajoittamista. SEVESO -direktiiviä on myöhemmin täydennetty uudeksi SEVESO II -direktiiviksi. [1]

Prosessien ja tehtaiden luontaiseen turvallisuuteen kiinnitettiin huomattavasti enemmän huomiota, joka on nykyäänkin erittäin tärkeässä osassa uusien prosessien kehitystä. [1]

Suuronnettomuuksiin varautuminen tuli tärkeäksi, ettei tässä tapauksessa toteutunut tilanne olisi mahdollista. Informaatio pitää kulkea viranomaisten ja tehtaan välillä sekä evakuointi on aloitettava heti onnettomuuden sattuessa. [1]

### 3.5 Syitä onnettomuuteen

Onnettomuudesta tuotiin esille neljä syytä, jotka olivat valmistusprosessin keskeytys, tislusmenetelmä, varokalvon asetuspaine sekä mahdollisten vuotojen keräys- tai tuhoamissysteemin puuttuminen. [1]

Valmistusprosessi keskeytettiin työvuoron päättyessä ja jätettiin viikonlopun ajaksi ilman sekoitusta ja jäädytystä. Tämän seurauksena kasvoi paine reaktorissa niin suureksi, että se repi varokalvoon vuotokohdan. [1]

Käytetyssä prosessissa oli tislusvaiheessa päinvastainen järjestys, kuin alkuperäisessä prosessissa. Tässä tapauksessa panos happamoitiin vasta tislauksen jälkeen, joka aiheutti pidennetyn reaktion etyleeniglykolin ja natriumhydroksidin välillä. Myös natriumhydroksidin molaripitoisuutta oli kasvatettu alkuperäisestä prosessista. [1]

Varokalvon asetuspaine oli 3,5 bar. Sen tarkoitus oli estää ylipaineen syntyminen paineistetun ilman käytöstä, jota käytettiin aineiden siirtoon reaktoriin. Mikäli asetuspaine olisi ollut matalampi, olisi vuoto tapahtunut alemmassa lämpötilassa, joka olisi ollut vähemmän vaarallista. [1]

Prosessiin ei ollut asennettu laitetta, jolla kerätään tai tuhotaan myrkylliset päästökaasut. Varokalvon valmistaja oli ilmoittanut, että varokalvoa voidaan käyttää tässä prosessissa, mikäli asennetaan säiliö, johon myrkylliset päästöt kerätään. [1]

Näiden mainittujen syiden lisäksi on myös muita syitä, jotka aiheuttivat onnettomuuden. Näitä syitä oli automaation puute sekä, että reaktoria ei ollut testattu hydraulisella testillä, jotta se kestäisi käytettyjä olosuhteita. [1]

#### **4 Mexico City**

Marraskuun 19. päivän aamuna 1984 Mexico Cityssä tapahtui suuronnettomuus, syntyi suuri tulipalo ja tapahtui räjähdyksiä toistensa perään. Onnettomuus sattui PEMEX:n nesteytetyn bensiinihöyryn (LPG) jakelualueella, jossa menehtyi 500 henkilöä. [1]

#### 4.1 Terminaalialue

Terminaalialueen vanhin osa oli jo yli 20 vuotta vanha ja ajan kuluessa oli alueen ympärille kehittynyt asuinalue. Vuoteen 1984 mennessä oli asuinalue levinnyt jo 200m päähän tehtaasta, muutamia asuntoja oli jopa vain 130 m päässä. [1]

Terminaalista jaettiin LPG:tä, joka tuli terminaaliin putkilinjaa pitkin kolmelta eri jalostamolta. Terminaalialueella oli 16 000m<sup>3</sup>:n kapasiteetti LPG:n varastointiin, se käsitti 6 pallomaista tankkia sekä 48 vaakatasossa ollutta sylinterin muotoista tankkia. Päivittäin terminaalin kautta kulki 5000 m<sup>3</sup> nesteytettyä bensiinihöyryä. Kaksi suurinta säiliöpalloa olivat molemmat 2400 m<sup>3</sup> vetoisia ja neljän pienemmän pallon tilavuus oli 1600 m<sup>3</sup>. Terminaalialue itsessään oli 13 000 m<sup>2</sup>:n kokoinen. [1]

Terminaalialueen sanottiin olleen rakennettu yhdysvaltalaisen standardien mukaan ja suuri osa siitä oli rakennettu Yhdysvalloissa. Alueella oli maahan upotettu soihtu, jolla poltettiin kaasun ylimäärä. Se oli upotettu maahan, jotta voimakkaat paikalliset tuulet eivät sammuttaisi sitä. [1]

PEMEX:n terminaalialueen lisäksi alueella oli muidenkin yritysten jakeluvarastoja. Pohjoisessa 100–200 m päässä sijaitsi 67 säiliöautoa onnettomuuden tapahtuessa. Hieman kauempana oli useita muita kaasusäiliöitä. [1]

#### 4.2 Onnettomuuden kulku

Marraskuun 18. päivän aamuna olivat terminaalialueen varastot täytetty 400 km päässä sijaitsevalta jalostamolta. Edellisenä päivänä olivat varastot päässeet melkein tyhjentyään ja niiden täyttö oli aloitettu iltapäivällä. Kaksi suurinta säiliöpalloa sekä 48 sylinterin muotoista tankkia oli täytetty 90 %:sti täyteen ja

neljä pienempää säiliöpalloa 50 %:sti täyteen. Onnettomuuden sattuessa alueella oli siis noin 11 000 m<sup>3</sup>:a LPG:tä. [1]

#### 4.2.1 Vuoto ja räjähdys

Noin klo 5.30 huomattiin paineen pudotus valvomossa, sekä 40 km päässä sijaitsevalla putkilinjan pumppausasemalla. Halkaisijaltaan 20 cm putki, joka oli yhden pallosäiliön ja sylinterisäiliöiden välillä, oli murtunut. Valvomohenkilökunta yritti löytää syytä paineen pudotukselle, mutta ei onnistunut siinä. Nesteytetyn bensiinihöyryn vuoto jatkui noin 5–10 min. Kevyen 0,4 m/s tuulen ja viettävän rinteen takia kaasu liikkui lounaaseen, jossa ihmiset lähialueelta olivat kuulleet vuodon syntymisen ja haistoivat kaasun. [1]

Silmännäkijöiden mukaan kaasupilvi kasvoi 2 metrin korkuiseksi ja peitti 150m\*200m alueen, jolloin se saavutti soihdun liekin ja syttyi. Kaasupilven syttyminen synnytti korkean liekin ja aiheutti maaperään järistymisen. Syntyneen tulipallon laskeuduttua jäi maahan useita tulipaloja, tulipalo vuotokohtaan sekä lisäksi 10 taloa oli syttynyt tuleen. [1]

Terminaalien työntekijät yrittivät korjata vuotokohtaa ja he kutsuivat myös läheisiltä varastoilta apuvoimaa. He löysivät viisi henkilöä maasta kuolleina ja pahoin palaneina, jotka olivat ilmeisesti matkalla valvomoon tai miehittämään palopumppuja onnettomuuden hetkellä. Aivan viime hetkellä ennen räjähdystä oli joku ilmeisesti ehtinyt painaa hätäpysäytys -nappia. Lähialueen taloista ryntäsi ihmisiä ulos, mutta monet pysyttelivät sisällä luullen tapahtuneen olleen maanjäristys. [1]

#### 4.2.2 BLEVE

Ensimmäinen BLEVE tapahtui noin klo 5.45 ja noin minuutin kuluttua tästä, räjähti taas. Tämä räjähdys oli toinen suurimmista räjähdyksistä koko onnettomuuden aikana. Yksi tai kaksi pienemmistä säiliöpalloista muodosti BLEVE -räjähdysten, josta syntyi 300 m halkaisijaltaan ollut tulipallo. Samalla

alueelle satoi LPG -pisaroita, jotka peittivät kaikki pinnat ja syttyivät tuleen tulipallon kuumuuden ansiosta. Ihmiset alueella paloivat kuin soihdut. [1]

Seuraavaksi tapahtui räjähdysten sarja, kun sylinterisäiliöt synnyttivät BLEVE -räjähdysä. Puolentoista tunnin aikana tapahtui 15 räjähdystä. BLEVE -räjähdys syntyi neljästä pienemmästä säiliöpallosta sekä monista sylinterisäiliöistä. Räjähdysten synnyttämä maaperän järistys rekisteröitiin University of Mexican seismografilla. [1]

Säiliöt pirstoutuivat useiksi isoiksi sirpaleiksi, jotka lensivät kuin ohjukset. Suuria 10–40t paloja löytyi 25 kappaletta jopa 890 m päästä räjähdyspaikalta. Sylinterisäiliöiden sirpaleista löydettiin 15 kappaletta, painoltaan 20t, jopa 1200 m päästä. Neljää sylinterisäiliötä ei löydetty koskaan. Sirpaleohjukset aiheuttivat suuria vahinkoja osumallaan sekä kuumuudellaan, joka riitti talon syttymiseen. [1]

Tulipalon syttyessä olivat ihmiset matkalla töihin. Silminnäkijät puhuivat suuresta, punaisesta ja kuumasta valosta, savusta ja hapen puutteesta, painealloista sekä lentävistä sirpaleista. Myös oranssin värinen sienipilvi oli nähty tapahtuman aikana. Viimeiset liekit sammuiivat alueella vasta illalla klo 23.00 aikoihin. [1]

#### 4.3 Onnettomuuden jälkeen

Tiedot tapahtuneesta eivät kerro kenen vastuulla onnettomuustilanteissa toimiminen oli tehtaan sisällä. Alueen suurin pelastusoperaatio oli huipussaan klo 8–10. Pelastusoperaatioon osallistuneet ihmiset olivat suuressa vaarassa mahdollisen BLEVE -räjähdysen vuoksi, mikäli tuona aikana olisi tapahtunut BLEVE -räjähdys, olisivat alueella olleet yli 3000 pelastustyöntekijää menehtyneet. Monet palomiehet polttivat itsensä suojellessaan ehjiä säiliöpalloja tulelta, mutta he onnistuivat estämään lisäräjähdykset. [1]

#### 4.4 Syitä

Asutusalueen leviäminen liian lähelle tehdasaluetta oli suuri syy isolle uhri luvulle, sekä vahingoittuneelle omaisuudelle. Tulevaisuudessa tämä oli syytä huomioida, jotta välttyään vastaavalta tuholta ja hävitykseltä. [1]

Nesteytetyn bensiinihöyryn säiliöt olivat huonosti sijoitettu, jolloin tulipalot ja räjähdykset levisivät liian nopeasti. Tulevaisuudessa tuli kiinnittää huomiota tehdasalueen yleissuunnitteluun ja layoutin tekemiseen, jotta saavutettaisiin parempi luontainen turvallisuus. [1]

Ainoa keino, jolla tällainen onnettomuus olisi voitu kokonaan välttää, olisi ollut kaasunhavaitsemislaitteisto ja mahdollisen vuotokohdan eristysjärjestelmä. Mexico Cityssä ei ollut käytössä minkäänlaista kaasunhavaitsemista edistävää järjestelmää, jonka vuoksi vuotokohdan eristystä ei ehditty suorittaa ajoissa. [1]

Jälleen voimme todeta, että vahingot olisivat jääneet huomattavasti pienemmiksi, mikäli olisi ollut käytössä toimintaohjeet suuronnettomuuden varalle. Tässä tapauksessa syntyi lähialueiden asukkaiden toimesta liikennekaaos, joka hankaloitti pelastuskaluston alueelle pääsyä. [1]

Pelastustoimista kritiikkiä sai palomiesten toiminta alueella, jossa oli mahdollisuus BLEVE -räjähdykseen, jonka tapahtuessa olisi menehtyneitä uhreja tullut moninkertainen määrä. [1]

## **5 Bhopal**

Joulukuun 3. päivän aamuna, vuonna 1984, erittäin myrkyllistä metyyliisosyanaattia (MIC) sisältäneen säiliön alennusventtiili laukesi Union Carbide India Ltd:n (UCIL) tehdasalueella, Intian Bhopalissa. Vuotaneesta MIC:stä syntyi kaasupilvi, joka levittyi tehdasaluetta ympäröineen hökkelikylän päälle. Melkein 2000 ihmistä menehtyi lyhyessä ajassa, lisäksi kymmenille tuhansille tuli vammoja. Joidenkin lähteiden mukaan onnettomuuden vuoksi hoidettiin paikallisissa sairaaloissa lähes 200 000 ihmistä. [1]

Bhopalissa tapahtunutta suuronnettomuutta pidetään toistaiseksi maailman pahimpana onnettomuutena. Kaiken kaikkiaan onnettomuuden vuoksi kuoli yli 3800 ihmistä, lisäksi arvellaan 11 000 ihmisen kärsivän onnettomuuden aiheuttamista sairauksista ja vammoista. [1]

## 5.1 Yritys

Union Carbide aloitti toimintansa Intiassa vuonna 1904, jonka jälkeen se oli laajentanut toimintaansa 14 laitokseen vuoteen 1983 mennessä. Bhopalin tehdas aloitti toimintansa vuonna 1969, jolloin se tuotti karbamaattipeptisidiä torjunta-aineeksi Yhdysvalloista tuodusta konsentraatista. Vuonna 1975 UCIL sai luvan aloittaa oman karbaryylin tuotannon. Tuotantoprosessiksi valittiin saman prosessi, joka oli käytössä emoyhtiöllä Länsi-Virginiassa, Yhdysvalloissa, mutta aluksi raaka-aineena käytettävä MIC tuotiin muualta. [1]

Tuotanto aloitettiin vuonna 1979, jolloin sen tuotantokapasiteetti oli 5250t vuodessa. Kysynnän vähyiden vuoksi tuotantoa supistui 2704t:iin vuonna 1981 ja romahti 1657t:iin vuonna 1983, minkä vuoksi tehtaan toiminta ei enää ollut kannattavalla tasolla. [1]

Ennen onnettomuutta tehtaan johtorakenne muuttui, kun johtoon tulivat Intian yksikön omat johtajat, ja emoyhtiöstä tulleet johtajat jättivät vastuun heille. Lisäksi muuta henkilökuntaa vähennettiin 450 henkilön verran. Tuotantohenkilökuntaa MIC:n valmistuksessa vähennettiin 12:sta 6:een. [1]

## 5.2 Tehdasalue

Bhopalin tehdas sijaitsi erittäin tiheästi asutulla alueella, jossa oli alkuperäistä asutusta jo ennen tehdasta. Tehdasalueen ympärille kehittyi lisää asuinalueita sen aloitettua toimintansa vuonna 1969. Alueelle tuli useita hökkelilyiä, joissa asui suuri määrä ihmisiä. Hallitus hyväksyi nämä laittomat asuinalueet, sillä se ei halunnut häätää alueen vallanneita ihmisiä. [1]

### 5.3 Prosessi

MIC:n valmistusprosessissa monometyyliamiini (MMA) reagoi fosgeenin ylimäärän kanssa kaasufaasissa, josta syntyy metylykarbaomylikloridia (MCC) sekä kloorivetyä, jotka jäädytetään kloroformissa. Reagoimaton fosgeeni erotetaan jäädytetystä liuksesta tislamalla, jonka jälkeen se kierrätetään reaktoriin. Tislauksen jälkeen jäljelle jäänyt neste syötetään pyrolyysivaiheeseen, jossa muodostuu MIC:tä. Pyrolyysivaiheesta virta jatkaa syötöksi MIC:n jalostushaihdutukseen (MRS), josta MIC kerätään talteen ja varastoidaan. [1]

Fosgeeni tuotettiin tehtaalla kloorista ja hiilimonoksidista, joka myös valmistettiin tehtaalla. [1]

MIC varastoitiin kolmeen säiliöön, joista kaksi oli normaalikäyttöä varten, ja yksi toimi varasäiliönä. Säiliöt olivat pitkänmallisia ja tilavuuksiltaan lähes 60 000 litraa. Ne oli tehty ruostumattomasta teräksestä ja niiden suunnittelupaine oli 3,7 bar 121 °C lämpötilassa ja hydrostaattisessa painetestissä yli 5 bar. 30t jäädytysjärjestelmä piti säiliöiden sisällön 0 °C:ssa kierrättämällä jäädytysnestettä ulkoisen lämmönvaihtimen kautta. [1]

Jokaisessa säiliössä oli paineensäädin, joka toimi säätämällä kahta kalvoventtiiliä, joko syöttämällä typpeä sisään tai tuulettamalla kaasuja pois. Kussakin säiliössä oli turvavaroventtiili, jota suojaasi varokalvo. Lisäksi niissä oli korkean lämpötilan hälytys, sekä pinnan minimi- ja maksimihälytys. [1]

Kaasunpesutorni (VGS) ja soihtu käsittelivät poistokaasut. Kaasunpesutorni oli täytekappalekoloni, jossa poistokaasut käsiteltiin lipeällä. Kolonnin syötöt tulivat sekä MIC -prosessista, että varoventtiilin tuuletuksesta. Kummatkin syötöt olivat liitetty sekä kolonniin, että soihtuun. Kolonnin ulostulo oli 33 m korkeudessa. VGS pystyi hallitusti käsittelemään molemmat edellä mainitut syötöt sekä nesteenä, että kaasuna. [1]

Prosessissa käytetyn soihdun tehtävänä oli polttaa hiilimonoksidiyksikön sekä MMA-haihduttimen poistokaasut, lisäksi sillä poltettiin MIC -säiliöiden, MRS:n sekä VGS:n poistokaasut. [1]

#### 5.4 Tapahtumat ennen onnettomuutta

Vuonna 1982 oli emoyhtiön turvallisuusryhmä tutustunut Bhopalin tehtaaseen. Ryhmä löysi useita epäkohtia tehtaan toiminnan turvallisuudessa, joista mainitsen nyt muutamia. [1]

- Kiinteiden suojelevesipisteiden puute useissa tehdasalueen kohteissa
- Myrkyllisen materiaalin mahdollinen vuoto fosgeeni- ja MIC -prosessien yhteydessä, sekä varastoinnissa. Mahdollinen vuoto tulkittiin johtuvaksi laitteistoviasta, käyttöongelmista tai kunnossapidon ongelmista.
- Varoventtiilien sekä laitteiden kunnossapitosuunnitelman puute
- Suuren henkilöstövaihtuvuuden aiheuttamat ongelmat, varsinkin tuotannossa

Turvallisuusryhmän suosituksesta vaihdettiin MIC -prosessin venttiilit, mutta yhdessä säiliössä ne hajosivat uudelleen, eikä niitä korjattu. Onnettomuuden tapahtuessa olivat uusitut venttiilit olleet epäkunnossa jo yli vuoden. [1]

Vuosien 1981 ja 1984 välisenä aikana oli tehdasalueella tapahtunut useita vakavia onnettomuuksia. Vuoden 1981 joulukuussa kolme työntekijää oli altistunut fosgeenikaasulle, joista yksi menehtyi. Kaksi viikkoa myöhemmin altistui 24 työntekijää jälleen fosgeenille. Vuoden 1982 helmikuussa 18 työntekijää altistui MIC -vuodossa ja saman vuoden lokakuussa kolme työntekijää loukkaantui sekä lähialueen asukkaat altistuivat kloorivedylle ja kloroformille. [1]

Jälkimmäisen onnettomuuden jälkeen työntekijät ilmaisivat huolensa lisäonnettomuuksista ja tuhansien ihmisten turvallisuudesta. [1]

Vuotta ennen suuronnettomuutta kytkettiin prosessin tuuletuspää ja varoventtiili apulinjalla. Tämän kytkennän tarkoituksena oli mahdollistaa kaasun ohjaaminen VGS:ään, mikäli jossakin tuuletuspäässä oli korjauksen tarvetta. [1]

Vuoden 1984 kesäkuussa 30t MIC -säiliön jäähdytysjärjestelmä suljettiin, koska freonijäähdyke oli kuivunut järjestelmästä. [1]

Lokakuussa VGS sammutettiin, koska ilmeisesti luultiin, ettei sitä tarvita, kun MIC:tä ainoastaan varastoitiin, ei valmistettu. Samassa kuussa soihtutorni poistettiin käytöstä, jotta siitä olisi voitu korjata kulunut putkisto. [1]

Myös MIC -säiliön paineistamisessa oli ongelmia. Kaasun poistoventtiilin epäiltiin vuotavan, sillä typen syöttö onnistui, mutta paineistus ei ottanut onnistuakseen. Työntekijöiden mukaan tehtaalla oli myös muita laitevikoja. Korkean lämpötilan hälytys ei ollut toiminut pitkään aikaan. Lisäksi ongelmia oli ollut myös pinnan valvonnassa ja paineen säädössä. [1]

Tehdasalueella oli myrkyllisten kaasujen varalta hälytysjärjestelmä. Se käsitti äänekkään sireenin lähialueen asukkaita varten, sekä äänettömän hälytyksen tehdasalueelle. Molemmat sireenit olivat yhteydessä toisiinsa ja voitiin aktivoida tehtaalta. Äänekäs sireeni voitiin hiljentää irrottamalla sen yhteys toiseen sireeniin. Tämä poiskytkeminen oli vain tehtaan esimiehelle mahdollista. [1]

Työntekijät kertoivat, että joulukuun 2. päivän aamuna aloitettiin pesuoperaatiot. Ohjeissa käskettiin huuhdella jakelusuunnan puoleiset neljä varalinjaa. On arveltu, että huuhtelussa pääsi vettä MIC -säiliöön venttiilien vuotojen sekä aiemmin mainitun apulinjan kautta. Lisäksi tämä teoria vaati sen, että useita muita venttiilejä olisi ollut huuhtelun aikana auki. [1]

## 5.5 Onnettomuuden kulku

Joulukuun 2. päivän iltana vuoronvaihto tapahtui klo 22.45. Valvomossa ollut prosessinhoitaja havaitsi MIC -säiliön paineen nousseen melkein 2 bar:iin klo 23.00. Se oli normaalia korkeampi paine, mutta käyttöpaineen rajoissa. Samaan

aikaan kenttäoperaattori raportoi MIC -vuodosta VGS:n lähellä. Kenttäoperaattori ilmoitti uudesta MIC -vuodosta prosessialueella klo 00.15. Samaan aikaan valvomossa havaittiin MIC -säiliön paineen nousseen jo yli 3 bar:iin, ja se jatkoi nousuaan. [1]

Valvomossa havainnon tehnyt työntekijä kutsui esimiehen paikalle ja juoksi säiliölle. Hän kuuli jyrisevää ääntä säiliöstä ja kirskuvaa ääntä varoventtiilistä. Tämän lisäksi hän tunsi säiliön hohkaavan kuumuutta. Työntekijä palasi valvomoon ja käynnisti VGS:n, mutta se ei ollut käynnistysvalmiina, sillä kiertopumppu ei ollut käytössä. [1]

Tuotannonvalvoja ilmoitti tehtaan esimiehelle vuodosta klo 00.20. Johdannaisyksikön tuotanto keskeytettiin klo 00.45 korkean MIC -pitoisuuden vuoksi. Johdannaisyksikön operaattori käynnisti myrkkykaasuhälytyksen klo 01.00, jonka äänekäs sireeni sammutettiin 5 min kuluttua. [1]

Samoihin aikoihin tehtaan esimies ja valvomotyöntekijä vahvistivat MIC -vuodon VGS:ssä, jonka jälkeen he käynnistivät suojeluvesipisteet, jonka piti estää kaasua levittäytymästä ympäristöön. Vettä ohjattiin myös MIC -säiliön alustaan sekä VGS:n kokoojaan. Säiliön betonikuoren halkeamista nousi höyryä, joka kertoi säiliön olevan erittäin kuuma. Yksi tehtaan valvojista yritti kiivetä tukkimaan vuotoa, mutta putosi säiliön päältä murtaen molemmat jalkansa. [1]

Varoventtiili saatiin kuntoon joskus klo 01.30 ja klo 02.30 välillä, jolloin MIC -vuoto lakkasi. Noin klo 02.30 äänekäs hälytyssireeni käynnistyi jälleen. MIC -pilvi leijui tuulen avustamana tehtaalta etelään, kohti asutusta. [1]

#### 5.5.1 Altistus

Ympäröivän alueen asukkaat tunsivat kaasun ärsyttävät vaikutukset ja he juoksivat ulos taloistaan, jotkut kohti tehdasta. Lyhyen ajan kuluttua eläimiä ja ihmisiä alkoi menehtyä. Noin 2 km päässä kerrottiin kuolleen neljässä minuutissa 150 ihmistä, 200 halvaantui, 600 menetti tajuntansa. Näiden lisäksi 5000 ihmistä altistui vakavasti. Yhteensä tällä alueella asui 10 000 ihmistä. [1]

Ihmiset yrittivät soittaa tehtaalle, mutta eivät saaneet yhteyttä. Kaasupilvi leijui alueen yllä koko joulukuun 3. päivän ajan, jolloin se lopetti liikkeensä kohti kaupunkia, mutta jatkoi siihen suuntaan seuraavana yönä. [1]

Suurin ongelma altistuneiden auttamisessa oli se, että kukaan ei tiennyt mille kaasulle ihmiset olivat altistuneet. Myöskään sen aiheuttamat oireet eivät olleet tiedossa. Maailmalla spekulointiin kaasun laadusta muutamia päiviä, kunnes yhtiö antoi ymmärtää kaasun olevan MIC:tä, joka aiheuttaa silmien ärtymistä, mutta ei ole tappavaa. Kun kuolleita alkoi löytyä, alkoivat lääkärit epäillä kaasua syanidiksi. Näiden arvailujen vuoksi syntyi kiistaa hoitomenetelmistä, sillä eri kaasujen altistuksia olisi tullut hoitaa eri menetelmillä. [1]

## 5.6 Tutkimus

Emoyhtiön oman tutkimusryhmän mukaan MIC -säiliön sisältö oli ollut alun perin 15–20 °C, jonka jälkeen sinne oli päässyt tuntemattomasta lähteestä 450–900 kg vettä. MIC ja vesi reagoivat eksotermisesti, joka synnytti lämpöä ja kehitti hiilidioksidia, joka taas nosti painetta säiliössä. Korkea lämpötila ja kloroformin läsnäolo kiihdytti säiliön korroosiota, josta vapautunut teräs toimi katalyyttinä MIC:n trimerisaatiossa. [1]

Laskelmien mukaan MIC:n 40 %:nen reagointi riittäisi höyrystämään siitä loput. Tästä päätellen säiliössä olisi pitänyt olla yli 16t kiintoainetta, tutkimuksissa sitä löydettiin vain reilut 4t. Lopun kiintoaineen arveltiin karanneen varoventtiilin kautta. Ilmoituksen mukaan varoventtiili oli auki noin kaksi tuntia. Laskelmien mukaan varoventtiilin ollessa asetettu aukeamaan 3,5 bar:ssa, olisi vuoto ollut 4500 kg/h, mutta vuodon todettiin todellisuudessa olleen ainakin 18 000 kg/h. [1]

Useat eri tekijät edesauttoivat onnettomuuden etenemistä. Jäähdytysjärjestelmän sammuttaminen, sokeoinnin puuttuminen pesuoperaatiossa, soihdun käyttökatos sekä VSG:n toimimattomuus ovat näistä syistä muutamia. [1]

Veden ja typen varastojen täydennys tapahtui vierekkäisillä suuttimilla, jolloin arveltiin, että mikäli vettä on vahingossa syötetty typpisäiliöön, on myös se saattanut olla syynä veden säiliöön pääsemiseen. Tämä näkökanta tulkittiin sabotaasin epäilyksi, mutta tästä ei ollut mitään todisteita. Myös veden suoraan syöttämiseen MIC -säiliöön otettiin kantaa, sen olisi voinut tehdä joku työntekijöistä, mutta siitä ei saatu varmuutta. [1]

## 5.7 Syitä

Tästäkin onnettomuudesta opittiin paljon samoja asioita, joita on aikaisemmissa tapahtumissa kerrottu. Julkinen valvonta vaarallisissa tehtaissa, niiden sijoittaminen pois asutuksen läheltä, tiedonkulku viranomaisten, tehtaan johdon ja asukkaiden välillä sekä johtojärjestelmien puutteellisuus ovat näistä muutamia. [1]

Jakelusuunnan puoleisten varalinjojen pesussa olisi tullut sokeoida linjat, jotta vesi ei olisi päätenyt MIC -säiliöön, eikä olisi tapahtunut aiemmin mainittuja reaktioita. [1]

Tapahtuneen eksotermisen reaktion ei uskottu tapahtuvan varastointisäiliössä, jonka vuoksi sen olosuhteisiin ei kiinnitetty riittävästi huomiota ja sinne päästettiin epähuomiossa vettä. Yleensäkin varastoinnissa käytettäviin materiaaleihin ja laitteistoon ei ollut panostettu riittävästi. [1]

Prosessin luontainen turvallisuus oli heikolla tasolla, siinä käytettiin vaarallista MIC -kemikaalia, jota ei olisi prosessissa eri muunnelmassa tarvinnut käyttää. Lisäksi vaarallisia aineita varastoititiin turhaan suuria määriä kerralla. [1]

Varoventtiileiden ja muiden varolaitteiden asetusarvot tulisivat asettaa vain hieman normaalien käyttöarvojen yläpuolelle, jotta reaktion karatessa ei ehtisi syntyä niin korkeita lämpötiloja ja paineita. [1]

Prosessissa käytetyn soihdun käytöstä poisto oli vaarantava virhe, se on prosessin turvallisuutta edistävä järjestelmä, eikä prosessia ollut turvallista käyttää ilman kaikkia turvalaitteita. [1]

Tämän tapauksen suurin virhe oli erittäin heikko kunnossapidon taso. Laitteistot olivat jo aikaisemmin saaneet huomautuksen kunnostaan ja niiden toimimattomuus oli mitä suurimmalla todennäköisyydellä yksi onnettomuuteen johtaneita syitä. Kaiken lisäksi prosessista oli sammutettu jäähdytysjärjestelmä, jonka vuoksi MIC -säiliön lämpötila oli noussut alkuperäisestä 0 °C:sta. [1]

## **6 Pasadena, Texas**

Lokakuun 23. päivänä 1989 tuhoutui Phillips Petroleum- yhtiön polyetyleenitehdas massiivisessa räjähdyksessä Texasin Pasadenassa. Onnettomuuden yhteydessä pääsi valtava määrä syttymisherkkää ainetta vuotamaan ilmaan, josta syntynyt kaasupilvi syttyi ja räjähti alle kahden minuutin kuluttua vuodosta. Onnettomuudessa menehtyi 23 henkilöä ja yli 300 loukkaantui. Materiaalivahingot ja toiminnan keskeytyminen tuli maksamaan yhteensä yli 140 miljardia yhdysvaltain dollaria. [2, 3]

### 6.1 Tehdasalue

Phillips Petroleum- yhtiön polyetyleenitehdas sijaitsi Houstonin kaakkoispuolella olevalla esikaupunkialueella. Tehtaalta on Houstonin kaupungin keskusta noin 10 km, noin samalla etäisyydellä on myös lentokenttä. Tehtaan vierestä kulkee Houstonin laivakanava. [2]

### 6.2 Prosessi

Korkean tiheyden omaavaa polyetyleenä valmistettiin korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Reaktiossa noin 95 % raaka-aineena käytetystä etyleenistä liukenee isobutaaniin, jolloin syntyy polyetyleenipölyä, joka erotetaan prosessista laskeuttamalla se erilliseen haaraan. Tuote poistetaan venttiilin kautta haaran pohjalta. Lisäksi prosessissa käytettiin muita kemikaaleja, kuten vetyä ja heksaania, jotta tuotteelle saatiin halutut ominaisuudet. [2]

Mikäli joko haara tai poistoventtiili tukkeutuu tuotteella, tulee ohjeiden mukaan eristää laskeutushaara reaktorista sulkemalla iso palloventtiili. Palloventtiili on asennettu reaktorin ja laskeutushaaran yhtymäkohtaan. [2]

Mikäli palloventtiili aukaistaan kesken puhdistustoimenpiteiden, pääsee reaktorin sisältö vapaasti tuulettumaan ulkoilmaan. Palloventtiilit toimivat paineilman avulla ja onnettomuuspaikalla olevassa venttiilissä olivat sekä aukaisulinjan, että sulkulinjan liittimet samanlaiset, jolloin työntekijä ei pystynyt varmuudella sanomaan kumpi linja on kumpi. [2]

### 6.3 Onnettomuuden kulku

Onnettomuuden tapahtuessa oli onnettomuuspaikalla käynnissä huoltotyöt, jonka vuoksi reaktorin ja laskeutushaaran välinen palloventtiili tuli olla suljettu paineilman avulla. Huoltoa edeltävät toimenpiteet oli tehty onnettomuutta edeltävien päivien aikana. Töiden tärkeysjärjestysten vuoksi huoltotoimet aloitettiin vasta kahden päivän kuluttua venttiilin sulkemisesta. [2]

Lokakuun 23. päivän iltapäivällä tapahtui valtava kaasuvuoto, jossa arvioitiin vuotaneen 99 % reaktorin sisällöstä ulkoilmaan, jolloin se muodosti herkästi syttyvän pilven ja räjähti. Räjähdyksen voiman on arvioitu vastaavan 2,4t TNT-räjähdyksestä. [2]

Mahdolliseksi syttymislähteeksi arveltiin mm. trukki, kaasulla kuumentava katalyytin aktivoija, jossa oli avoliekki, lähistöllä tapahtunut hitsaustyö tai ajoneuvot tehtaassa lähellä. [2]

Muodostunut räjähdys lennätti metalli- ja betonijätettä lähes 10 km päähän, lisäksi sen aiheuttamana havaittiin seismografeilla 3–4 richterin järjestyksiä. Tapahtumaa seurasi muutama jälkiräjähdys noin 10–15 minuutin kuluttua, kun kaksi 75 m<sup>3</sup> isobutaani säiliötä räjähti. Kaiken kaikkiaan tapahtuman aikana tapahtui 6 jälkiräjähdystä. [2, 3]

Kaikki 23 onnettomuudessa menehtynyttä henkilöä olivat kaasupilven räjähtämisen aikana alle 80 m päässä vuotopaikasta. Tutkinnan perusteella vuoto

tapahtui huollettavan reaktorin palloventtiilistä. Se oli ollut auki vaikka valvomon käyttökytkin oli ollut kiinni- asennossa. Tämä johtui siitä, että huoltotoimia valmisteltaessa olivat paineilmaletkut sekoitettu ja ne toimivat valvomon kytkimen kanssa päinvastoin. [2]

#### 6.4 Syitä

Yhtiön toimintaohjeiden mukaan olisi huoltotöiden aikana tullut käyttää venttiileissä tuplavarmistusta tai linjan sokeoimista aina kun prosessilinja avattaisiin. Pasadenan tehtaalla oli kehitetty oma menettely tällaisiin tilanteisiin, mutta se ei sisältänyt kumpaakaan edellytettyä menetelmää. [2]

Tutkinnassa todettiin myös muita turvallisuuspuutteita. Palloventtiilin sokka ei ollut paikallaan, jonka vuoksi paineilmaletkut pystyttiin kytkemään venttiiliin huoltotöiden aikana vaikka ohjeistuksessa sen ei pitänyt olla mahdollista. Lisäksi todettiin, että palloventtiilin asennon muuttaminen oli mahdollista huoltotöiden aikana vahingossa tai tahallisesti, sillä paineilmaletkut olivat kiinni venttiilin liittimissä. [2]

Prosessin mahdollisia vaaroja ei ollut tutkittu lainkaan, jonka vuoksi löydettiin useita turvallisuusriskejä, joihin olisi voitu puuttua ajoissa, mikäli ne olisi havaittu. [2]

Kaiken kaikkiaan tehtaan toimet olivat erittäin epäilyttävät vaarallisten prosessien riskienhallinnan tai riskianalyysin suhteen. Se oli jättänyt huomioimatta useita ohjeistuksia, joita sen olisi tullut noudattaa vaarallisen prosessin vuoksi. [2]

Polyetyleeniprosessin lähellä ei ollut lainkaan kaasunhaistajaa tai hälytyssysteemiä, jolla olisi vuoto voitu havaita ajoissa ja toimia alueen eristämiseksi. Lisäksi paikalla oli paljon mahdollisia syttymisen lähteitä, joita ei olisi pitänyt olla niin lähellä syttymisherkkää prosessia. [2]

Onnettomuus olisi voinut aiheuttaa paljon suurempaa tuhoa, sillä polyetyleeniprosessin läheisyydessä ollut hiilivetyprosessin rakennuksen

ilmanvaihtojärjestelmän ilmanotto oli aivan onnettomuustehtaan tuntumassa, jolloin vuotanut kaasu olisi voinut kerääntyä sisätiloihin ja aiheuttaa suuren räjähdysriskin suljetussa tilassa. [2]

Kaikenlisäksi tehtaan paloturvallisuusjärjestelmä oli jätetty huoltamatta ja vesipumput ja -säiliöt olivat heikossa kunnossa. Tehdasalueen layout ei ottanut riittävästi huomioon prosessien tarvitsemia turvallisuus etäisyyksiä, puhumattakaan rakennusten ja prosessien välisten eristysten tarpeellisuudesta. [2]

## **7 AvestaPolarit Stainless Oy (nykyinen Outokumpu Stainless Oy)**

Syyskuussa 2003 tapahtui terästehtaalla onnettomuus, jossa happilinjan pääsulkuventtiiliä avattaessa syttyi räjähdysmäinen tulipalo. Kolme henkilöä menehtyi tapahtuneessa onnettomuudessa. [4]

### **7.1 Tehdasalue**

AvestaPolarit Stainless Oy:n 4,2 km<sup>2</sup>:n kokoinen terästehdasalue sijaitsee Röntän kaupunginosassa, noin 10 km päässä Tornion keskustasta etelään. Onnettomuus tapahtui viisikerroksisen tehdashallin kolmannessa kerroksessa. Sää onnettomuuden aikana oli selkeä, eivätkä sääolosuhteet vaikuttaneet onnettomuuden syntyyn, eikä jälkiseurauksiin. [4]

### **7.2 Prosessi**

Tornion terästehtaalla käytetään happikaasua konvertterissa teräksen hiilipitoisuuden vähentämiseen sekä vähäisiä määriä sulankäsittelyastioiden kuumennuspolttimissa. Tehtaan happijärjestelmä voidaan jakaa kaasuasemaan, raakahappilaitokseen, hapen siirtoputkistoon sekä hapen varastosäiliöihin. [4]

Onnettomuus tapahtui nk. sulatto 2:ssa, joka oli otettu käyttöön alkuperäisen sulatto 1:sen rinnalle vuonna 2002. Sulatto 2 poikkeaa sulatto 1:stä siten, että se oli suunniteltu ja rakennettu 40 bar:n nimellispaineelle, kun 1. oli toteutettu 25

bar:n nimellispaineelle. Sulatto 2:ssa oli putkiston halkaisija 300 mm, kun sulatto 1:ssä se oli 150 mm. Sulatto 2:sen happilinjaa käytettiin aluksi 25 bar:n paineessa, mutta myöhemmin sen paine nostettiin 35 bar:iin. [4]

Hapen runkolinja tuli ulkoa kolmannessa kerroksessa sijaitsevaan venttiilihuoneeseen. Huoneessa oli onnettomuusventtiilin yläpuolella 90 °C mutka. Kaasuasemalta oli noin 700 m tähän venttiilihuoneeseen. Venttiilihuoneessa olleita venttiilejä käytettiin mm. linjan tyhjentämiseen ja työttämiseen. [4]

Venttiilihuone oli kevytrakenteinen ja osittain avoin tila, jonka lattia oli pääasiassa teräsritilää ja seinät aaltopeltiä. Happilinja tuli huoneeseen suoraan 6 mm paksuisen ulkoseinän läpi. Samassa huoneessa oli muita putkistoja, joissa kulki argonia, raakahapetta, paineilmaa ja hiilimonoksidia. Huoneen putkistoihin kuului mm. ohituslinjoja, tyhjennysyhteitä ja sulkuventtiilejä. [4]

### 7.3 Onnettomuuden kulku

Sulatto 2:n ensimmäinen vuosihuoltoseisokki oli päättymässä perjantaina 19.9.2003. Se oli kestänyt koko viikon ja tuotanto oli suunniteltu aloitettavaksi seuraavana maanantaina. Aikataulullisesti ei näyttänyt olevan paineita kiirehtiä asioita. [4]

Raakahapen ja puhtaan hapen linjoihin oli asennettu taskaiskuventtiilit, ne asennettiin onnettomuustason alapuolelle noin 15 m päähän. Onnettomuuspäivänä oli tarkoitus paineistaa huolletut linjat ja testata järjestelmän toimivuus, jota valmisteli sulaton valvomossa tehtaan työnjohtaja sekä linjan asentaneen yhtiön työnjohtaja. He lähtivät avaamaan linjojen pääsulkuventtiiliä kolmannen kerroksen venttiilihuoneeseen noin klo 10.35–10.40. [4]

Tutkinnan perusteella voitiin todeta heidän olleen perillä venttiilihuoneessa viimeistään klo 10.45. Sulaton lattiatasolla töitä tehnyt asennusyhtiön asentaja soitti venttiilihuoneessa olleelle työnjohtajalleen noin klo 10.50 kysyäseen neuvoa ongelmaan. Työnjohtaja käski asentajan lopettaa työnsä ja tuovan hänelle

putkipihdit venttiilihuoneeseen, sillä jonkin venttiilin käsipyörä luisti akseliltaan. Venttiilin sokka oli ilmeisesti myös rikki eivätkä he saaneet venttiiliä auki. [4]

Asentaja vei pihdit työnjohtajalleen, eivätkä venttiilihuoneessa työskennelleet työnjohtajat sanoneet sanaakaan asentajalle. Asentaja lähti heti takaisin alas työparinsa luokse. [4]

### 7.3.1 Räjähdykset

Välittömästi asentajan palattua alas, kuului kova räjähdys ja hän havaitsi liekkejä ja pölyä sekä savua venttiilihuoneen suunnassa. Järjestelmän hälytyksen perusteella räjähdys oli tapahtunut klo 10.52. Järjestelmän mukaan oli happilinjan paine pudonnut klo 10.50 jälkeen 35 bar:sta 16 bar:iin klo 10.54 mennessä. [4]

Alihankkijoiden työntekijöitä oli työskentelemässä hallin lattiatasolla noin 40m päässä onnettomuuspaikasta. Yksi miehistä kertoi kuulleensa juuri ennen räjähdystä onnettomuuspaikan suunnalta huudon ”varo!”. Jotkut miehistä kertoivat kuulleensa ennen onnettomuutta kovaa suhinaa, jollaista kuuluu kaasun virratessa putkeen. Toiset kertoivat suhinan alkaneen vasta onnettomuuden jälkeen. [4]

Onnettomuudessa pääsi vuotamaan happea noin 15 000 m<sup>3</sup> ennen kuin valvomosta pysäytettiin nestehapen syöttö höyrystimeen. Tähän kului aikaa noin 7 minuuttia onnettomuuden alkamisesta. Heti tämän jälkeen varmistettiin kaasulinjojen pysäytys sulkemalla kaikki venttiilit. [4]

Palokunnan saapuessa onnettomuuspaikalle, sieltä löytyi 2 uhria muutaman metrin päästä onnettomuusventtiilistä. Myöhemmin löytyi kolmas uhri, joka oli kulkenut neljännessä kerroksesta tupakkapaikalle onnettomuuden aikana. Tupakkapaikalle päästäkseen oli kolmas uhri laskeutunut portaita onnettomuuspaikan kohdalla. [4]

Onnettomuuspaikan ohi kulkenut koteloitu kuminen hihnakuuljetin sekä onnettomuuspaikan läheisyydessä olleet kulkutasot ja osa rakenteista paloi räjähdysmäisessä tulipalossa. Lisäksi onnettomuusventtiili paloi pahoin, putkilinja paloi puhki ja kääntyi reaktiovoiman vuoksi noin 3 metriä ylöspäin. Happilinjaa lisäksi venttiilihuoneessa olleista putkilinjoista vain paineilmaputki rikkoutui, muiden linjojen kärsiessä pienempiä vaurioita. [4]

#### 7.4 Tutkimus

Tutkinnassa selvisi onnettomuusventtiilin olleen juuttunut, sillä käsipyörän sokkana ollut ruuvi oli poikki ja venttiilin karassa oli putkipihdin leukojen jälkiä, jonka työnjohtaja oli pyytänyt avuksi käsipyörän luistamisen vuoksi. [4]

Tutkinnan mukaan juuttumisen olisi voinut aiheuttaa venttiilin tekninen vika tai läpän ja rungon väliin kiilautunut vieras kappale. Venttiilissä ei kuitenkaan ollut mitään vikaa ennen onnettomuutta. [4]

Venttiilin liikerajoittimen lukkoruuvien puuttuminen voi kertoa aikaisemmin havaitun juuttumisen korjausyrityksestä tai venttiilin kokoamisessa tapahtuneesta huolimattomuudesta. [4]

#### 7.5 Syttymissyyt

Syttymissyistä tutkittiin kirjallisuuden perusteella mahdollisia vaihtoehtoja, joista päättelyn ja testien perusteella voitiin pois sulkea muut vaihtoehdot paitsi ulkopuolinen lämmönlähde, hiukkasten törmäys sekä hankauskitka. [4]

Lisätutkimusten perusteella ulkopuolinen lämmönlähde on epätodennäköisin syttymissyyt. Hiukkasten törmäys on ollut syynä useassa happiputkiston palossa, eikä sitä nytkään suljeta pois mahdollisista syttymissyistä. Tutkinnan perusteella todettiin todennäköisimmäksi syttymissyiksi venttiilin jumittumisen ja siitä seuranneen hankauskitkan syntymisen. [4]

Hiukkastörmäysteoria esittää happivirtauksen mukana suurella nopeudella kulkeneiden hiukkasten törmänneen venttiilin runkoon, läppään tai metallitiivisteeseen. Tämä aiheutti kuumenemisen ja lopulta syttymisen. [4]

Kitkakuumenemista puoltava teoria esittää PTFE- liukulaakeroinnin vaurioitumisen, jonka seurauksena venttiilin läppä ja akseli olisivat muodostaneet kahden teräksen välisen kovan kosketuksen, joka olisi aiheuttanut syttymisen. [4]

Toinen hankauskitkateoria liittyy vieraan kappaleen kiilautumiseen, joka olisi synnyttänyt kitkakuumenemisen ja syttymisen. [4]

## 7.6 Päätelmät

Onnettomuus oli monien osatekijöiden summa. Onnettomuus johtui venttiilin jumittumisesta ja sen jälkeisistä tapahtumista sen avaamiseksi. Mahdolliset puutteet tehtaan toimintavoissa olivat mahdollisesti onnettomuuden taustatekijänä. Toimintatapoja ei ollut vakioitu eikä ohjeistettu riittävästi. Venttiilin jumittuminen oli poikkeustilanne, jolle olisi pitänyt olla omat ohjeistukset. [4]

## 8 Danisco, Kotka

Tammikuun 13. päivänä 2004 sattui Kotkassa Danisco Sweeteners Oy:n tehtaalla vetyräjähdys, joka aiheutti palovammoja sekä kuulovaurioita kunnossapitotyöntekijöille. Räjähdyks tapahtui kunnossapitotyön yhteydessä, jossa nostettiin reaktorin sekoittajaa ylös reaktorista. [5]

### 8.1 Tehdas

Kotkan Hovinsaaressa sijaitsevassa Danisco Sweeteners Oy:n tehtaassa valmistetaan ksylitolia ja fruktoosia elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Danisco Sweeteners Oy:n toiminta luokitellaan kemikaalien vähäiseksi käsittelyksi ja varastoinniksi. [5]

## 8.2 Prosessi

Ksyytoliprosessin raaka-aineen käytetään ksyyloosia, joka hydrataan ksyytoliksi liittämällä vetyä ksyyloosiin katalyytin läsnä ollessa. Katalyyttina käytettiin Raney-nikkeliä, joka on nikkelin, alumiinin ja molybdeenin seos. [5]

Kotkan tehtaassa liuotuslaitos, reaktoritila ja valvomo muodostivat hydrauslaitoksen. Näiden lisäksi laitoksella oli vetykennotila, joka oli poistettu käytöstä vuonna 2001. Siinä valmistettiin aikaisemmin vetyä hydrausprosessille. [5]

Tehtaan hydrausprosessissa käytettiin neljää  $6,5 \text{ m}^3$  reaktoria ja tila, jossa ne sijaitsevat, luokitellaan räjähdysvaaralliseksi tilaksi (Ex-tila). Prosessin vety johdettiin samalla tehdasalueella sijaitsevalta Woikosken vetyasemalta, joka otettiin käyttöön vuoden 2001 lopussa. [5]

## 8.3 Tapahtumat ennen onnettomuutta

Tammikuun 11. päivän iltavuorossa todettiin yhden reaktorin jäähdytysnesteessä olleen sokeria, jonka arveltiin johtuvan reaktorin lämmitys-/jäähdytyskierukan vuodosta. Havaittu häiriötilanne ilmoitettiin työnjohtajalle, joka käski lopettaa kyseisen reaktorin käytön hydrausprosessissa. Työnjohtaja tarkasti itse tilanteen seuraavana päivänä, jonka jälkeen aloitettiin lämmitys-/jäähdytyskierukan huoltotöiden valmistelut tammikuun 12. päivän iltavuorossa. [5]

Hydrauslaitoksen työnjohtaja antoi suulliset ohjeet iltavuoron työntekijälle. Ohjeissa hän kertoi reaktorin vesikeitosta ja tämän jälkeen tapahtuvasta typetyksestä, jotka piti tehdä paineentasaussäiliön kautta. Koska vesikeiton laskettiin tapahtuvan yövuoron aikana, työnjohtaja kirjoitti ohjeet työtehtävistä valvomon ns. mustaan kirjaan. Typetyksestä ei jälkikäteen tarkastettuna löytynyt mitään kirjallisia ohjeita. [5]

Iltavuorossa suoritettiin paineentasaussäiliön ja reaktorin typetykset, jotka oli tehtävä ennen vesikeittoa. Yövuoron työntekijälle jätettiin vuoron vaihtuessa viesti, jossa kerrottiin mm. paineentasaussäiliössä olevan tyyppiä ja vetyventtiilien

olevan kiinni, reaktorin oleva tyhjä ja sen sisällä olevan pienen typpipaineen. Tämän lisäksi lapussa kerrottiin seuraavana vaiheena olevan vesikeitto ja katalyyttien ulospuskeminen. [5]

Yövuoron tullessa töihin, he jatkoivat tehtävien suorittamista ns. mustaan kirjaan kirjoitettujen ohjeiden perusteella, vesikeiton jälkeinen reaktorin typetys jäi suorittamatta, sillä siitä ei ollut merkintää kirjallisissa ohjeissa. Tämän vuoksi myöskään aamuvuorolaiset eivät saaneet tietoonsa typetyksen puuttumisesta. Yövuoron jättämissä ohjeissa reaktorin kerrottiin olevan tyhjä ja paineeton. [5]

Tammikuun 13. päivän aamuna kävi hydrauslaitoksen työnjohtaja keskustelun aamuvuoron kanssa, jossa hän tiedusteli huoltotöiden valmistelujen etenemisestä. Hän ei saanut vastausta reaktorin typetykseen, ja nähdessään yövuoron viestin, jossa ilmoitettiin reaktorin olevan tyhjä ja paineeton, työnjohtaja oletti, että typetys oli suoritettu ja reaktori valmis huoltotöihin. Keskustelun jälkeen työnjohtaja ja aamuvuoron työntekijä lähtivät valmistelemaan kolmea muuta reaktoria huoltoseisokkia varten. Työnjohtaja ehti itse typettää vetyasemalta tulevan putken, mutta antoi työntekijän tehtäväksi jatkaa typetyksiä, sillä työnjohtajan piti osallistua tuotantopalaveriin. [5]

Työnjohtaja tarkasti kaikkien reaktoreiden typetystilanteen palattuaan tuotantopalaverista ja havaitsi huollettavan reaktorin paineentasaussäiliön linjassa olevan 14 bar:n typetyspaineen. Tämän lisäksi hän huomasi vetyventtiilin olevan kiinni ja ulospuhallusventtiilin olevan auki. Tämä vahvisti yövuoron viestistä tehtyä oletusta, että korjaukseen menevä reaktori olisi typetetty. Asiaa ei koskaan varmistettu yövuoron työntekijöiltä, sillä käytännön mukaan tieto prosessin tilasta tuli välittää seuraavalle vuorolla kirjallisena viestinä, jonka työnjohtaja oli lukenut. Koska työnjohtaja oletti yövuoron suorittaneen korjaukseen menevän reaktorin typetyksen, ei hän tiedustellut olivatko aamuvuorolaiset tehneet sitä. [5]

Hydrauslaitoksen työnjohtaja kävi tämän jälkeen palaverin huoltotöiden suorittamisesta prosessipäällikön sekä kunnossapitovastaavan kanssa. Palaverissa todettiin kaikkien reaktoreiden olevan valmiita huoltoseisokille ja tarvittaville korjaustöille. Palaverin jälkeen laitettiin Ex- tilan työluupa valvomoon klo 9.30.

Työlupa oli allekirjoitettu etukäteen klo 8.00 ja reaktorien typerykset määrätty suoritettavaksi klo 8.30. Työnjohtaja myönsi myös reaktorin hitsaustöitä varten erillisen tulityöluvan alkavaksi klo 9.15. [5]

#### 8.4 Onnettomuuden kulku

Neljän henkilön kunnossapitoryhmä aloitti huoltotyöt korjattavalla reaktorilla, kun työluvat oli myönnetty. Kolme työntekijää työskenteli reaktorin vieressä ja yksi alemmalla tasolla. Kaksi ulkopuolisen kunnossapitoyrityksen työntekijää oli hitsaamassa reaktoritilan alapuolella. Samalla tasolla työskenteli myös kahden ammattikoululaisen ja opastajan muodostama ryhmä avaamassa lattiakaivoa. [5]

Kunnossapitotyöntekijät aikoivat nostaa reaktorin laipan sekä sekoittimen nosturin avulla, mutta työ keskeytyi pian alkavan ruokatunnin vuoksi. Laippa laskettiin ilmeisesti takaisin paikalleen tämän takia. Ruokatunnin jälkeen työt jatkuivat, jolloin laippa ja sekoitin nostettiin ja siirrettiin hieman sivuun. Kunnossapitotyöntekijä havaitsi sekoittajan varren kolahtavan reaktorin laippaaukon seinämään siirron aikana. Ilmeisesti tästä johtuen laipasta ja sekoittajasta irtosi kuivunutta nikkelikatalyyttia. [5]

##### 8.4.1 Räjähdykset

Välittömästi havainnon jälkeen seurasi leimahdus, jota seurasi räjähdys. Reaktoritilan paineenalennusseinän levyjä irtosi räjähdyksestä aiheutuneen paineaallon vuoksi. Räjähdykset eivät aiheuttaneet tulipaloa. Kukaan tiloissa ollut työntekijä ei menehtynyt, vaan kaikki pääsivät itse kävellen pois paikalta, mutta kunnossapitotyöntekijät auttoivat pahiten loukkaantuneen työtoverinsa vieressä olevan liuostilan hätäsuihkuun, jonka edusta oli täynnä tavaraa. Loukkaantunut työntekijä vietiin tästä johtuen läheisen sosiaalitalan suihkuhuoneeseen. [5]

Kolme kunnossapitotyöntekijää ja kuusi reaktoritilan alemmalla tasolla ollutta työntekijää loukkaantui räjähdyksessä. Kunnossapitotyöntekijöille aiheutui palovammoja eri puolille kehoa sekä kuulovaurioita. Yksi jouduttiin myöhemmin

toimittamaan Helsinkiin ihonsiirtotoimenpiteeseen. Alemmalla tasolla olleet työntekijät saivat räjähdysen aiheuttamia kuulovaurioita, mutta ne eivät ilmeisesti jää pysyviksi. [5]

Räjähdyksen jälkeen analysoitiin paineentasaussäiliön painemittarin tyhjennysyhte kaasunhaistajalla, jolloin todettiin, ettei yhteessä ollut räjähtäviä kaasuja. Tämän analyysin perusteella voitiin todeta, että typetykset oli tehty paineentasaussäiliöön asti. [5]

## 8.5 Syitä

Tutkinnan jälkeen todettiin onnettomuuden tapahtuneen pääosin inhimillisten virheiden sekä yhtiön johtamismenettelyissä olevien puutteiden seurauksena. Tutkinnassa ei havaittu mitään teknistä vikaa, joka olisi aiheuttanut räjähdysen. [5]

Tutkinnan mukaan onnettomuus johtui siitä, ettei hydrausprosessi ollut turvallisessa tilassa huoltotöiden aloittamishetkellä. Korjattavaan reaktoriin oli jäänyt vetyä, koska typetystä ei ollut suoritettu asianmukaisesti ja ennen kaikkea työnjohto ei ollut tietoinen reaktorin viimeistelytypetyksen puuttumisesta. [5]

Yövuoro ei suorittanut iltavuoron ohjeistamia tehtäviä, vaan suoritti tehtävät ns. mustan kirjan perusteella. Aamuvuoro ja työnjohtaja olettivat yövuoron viestin perusteella, että reaktorin typetys on suoritettu ja valmiina korjattavaksi. [5]

Vastoin hydrauksen työohjeen sisältöä, työnjohtaja ei ollut paikalla, kun reaktoria valmisteltiin huoltoa varten. Työnjohtaja ei myöskään ottanut yhteyttä yövuoroon ennen huoltotöiden alkamista, jotta olisi varmistunut kaiken tulleen tehdyksi. Tästä johtuen työnjohtajalle muodostui prosessin tilasta virheellinen mielikuva, joka perustui havaintoihin ja olettamuksiin, sekä yövuoron jättämään kirjalliseen viestiin. Hän tarkasti reaktorin typetystilan paineentasaussäiliön osalta, jonka perusteella päätteli reaktorin typetystilanteen. [5]

Edellä mainituista syistä johtuen reaktoriin oli päässyt muodostumaan räjähdyskelpoinen vety-ilmaseos viimeistään reaktorin laipan aukaisun yhteydessä. Reaktoritilassa oli vetyanalysaattori, mutta se ei hälyttänyt. [5]

Helposti syttyvän vety-ilmaseoksen syttymisen aiheutti todennäköisesti Raney-nikkelikatalyytti, joka hehkuu kuivana. Syttymisen on voinut aiheuttaa myös mekaaninen kipinä, joka olisi syntynyt sekoittajan akselin kolahtaessa reaktorin seinämään. Syttymisherkkyttä on mahdollisesti lisännyt myös hienojakoinen katalyyttipölypilvi, joka olisi hetkellisesti muodostunut reaktorin sisäpuolelle. [5]

## 8.6 Muita syytekijöitä

Tutkinnassa todettiin yhtiön johtamiskäytäntöjen sekä vuorojen työntekijöiden ja työnjohtajan välisen tiedonkulun puutteiden olleen onnettomuuden syntyyn myötävaikuttaneita tekijöitä. [5]

### 8.6.1 Johtaminen

Vaarallisen työvaiheen valvonta oli puutteellista, jonka vuoksi työnjohtaja ei voinut olla täysin varma tehtävien suorittamisesta täydellisesti. Tehtaalla ei ollut käytössä kuittausmenettelyä tai tarkistuslistaa, josta olisi huomattu yhden työvaiheen puuttuminen. Iltavuoron työntekijä sai suullisia tehtävänantoja työnjohtajalta, tehtäviä ei ollut jaettu yksilöllisesti ja turvallisuuden kannalta tärkeän työvaiheen, typetyksen, suorittaminen jakautui kahdelle eri vuorolle. Edellä mainitut osasyöt vaikuttivat inhimillisen virheen syntyyn. Työnjohtaja oli juuri palannut vuorotteluvapaalta, joka hänen omien sanojensa mukaan vaikutti negatiivisesti tekemiinsä päätöksiin ja asioihin. [5]

### 8.6.2 Tiedonkulku

Tiedonkulku tapahtuman aikana todettiin puutteelliseksi. Viestintä oli epäselvää vuorojen välillä, sillä viestejä ei ymmärretty oikein, jolloin tehdyt työvaiheet eivät olleet täysin selviä seuraaville vuoroille tai työnjohtajalle. Viestien välittämiseen

ei ollut selkeää menettelyä, vaan niitä annettiin irrallisilla korteilla tai suullisesti. Töiden ohjeistus oli liian yleisellä tasolla, joka näkyi varsinkin prosessin turvallisen tilan varmistamisessa. [5]

Hydrausprosessista oli tehty vuonna 1988 diplomityö, jossa riskejä oli tunnistettu ja arvioitu pääosin poikkeamatarkastelun (HAZOP) avulla. Riskianalyysin tarkkoja lomakkeita ei kuitenkaan enää ollut olemassa, sillä yhtiön arkistointikäytännöstä johtuen ne oli hävitetty. Diplomityössä oli suositeltu mm. tarkistuslistojen käyttöä, jotta varmistuttaisiin kaikkien työvaiheiden suorittamisesta. [5]

Prosessin vaarallisimpana pidetty vetykennosto oli poistettu käytöstä aiemmin, jolloin hydrauslaitoksen työntekijät eivät riittävällä tasolla tiedostaneet prosessin vaarallisuutta. [5]

## **9 Bp Products, Texas**

Isomerointiyksikön (ISOM) käynnistyksessä tapahtui lämmön karkaaminen, räjähdys ja tulipalo Bp Productsin jalostamolla Texasissa, maaliskuussa 2005. Onnettomuudessa menehtyi 15 henkilöä, jonka lisäksi yli 170 henkilöä loukkaantui. [6]

### 9.1 Tehdasalue

Texasin jalostamo on Bp Productsin laajin öljynjalostamo, jonka tuotantokapasiteetti oli jopa 42 000 m<sup>3</sup> bensiiniä päivässä. Jalostamolla valmistetaan myös lentokerosiinia, dieselöljyä sekä kemiallisia lähtöaineita. Tehdasalueella työskenteli 1800 vakituista työntekijää, jonka lisäksi onnettomuuden tapahtuessa alueella oli 800 aliurakoitsijoiden työntekijää. [6]

Ylimääräisten työntekijöiden vuoksi oli alueelle pystytetty ylimääräisiä rakennuksia toimistoiksi. Lähin rakennus oli pystytetty 50 m päähän isomerointiprosessista. Samalle paikalle oli ennenkin pystytetty lisärakennuksia,

kun on ollut käynnissä vastaavia muutostöitä, missä on tarvittu ylimääräisiä työntekijöitä. Rakennuksella ei kuitenkaan ollut lupaa olla miehitettynä. [6]

## 9.2 Prosessi

Onnettomuus tapahtui tehtaassa isomerointiyksikössä, joka koostuu neljästä osasta: rikin poisto ultrasuodatuksella, Penex- reaktori, kaasujen ja nesteiden kierrätys sekä jalosteenjakaja (raffinate splitter), joka erottaa ei-aromaattiset virrat ja fraktioi ne kevyiksi ja raskaiksi komponenteiksi. Lisäksi prosessissa oli oma alajasosysteemi ja paineenpoistojärjestelmät. [6]

Jalosteenjakaja oli alun perin tarkoitettu erilaiseen käyttöön, missä se oli onnettomuuden hetkellä. Siihen oli tehty tarvittavat muutostyöt, jotta sillä voitiin erottaa kevyet ja raskaat jakeet prosessissa. [6]

Alajasosysteemin tarkoitus oli kerätä, jäähdyttää ja käyttää kuumat hiilivetykaasut isomerointiyksiköstä, lisäksi sen avulla prosessi tyhjennettiin alajasjon yhteydessä. Systeemi koostui päästöputkistosta, paineenpoistoyksiköstä ja tyhjennuspumpusta. Kaasut dispergoituivat systeemin yläosasta ja nesteet kerättiin tehtaassa omaan jätevesikiertoon. [6]

## 9.3 Onnettomuuden kulku

Helmikuussa 2005 jalosteenjakaja sammutettiin suunnitellusti seisokin vuoksi, koska toisessa prosessin osassa tehtiin huoltotöitä. Jakajasta höyrystettiin hiilivedyt ulos prosessista kolmen päivän aikana. Huoltotyöt etenivät suunnitellusti lukuun ottamatta erään syöpyneen putkilinjan korjausta. [6]

Prosessia alettiin käynnistää maaliskuun 14. päivänä ja jalosteen jakajasta poistettiin typpipaine, jota oli käytetty järjestelmän tiiveyden tutkimiseen seisokin aikana. Maaliskuun 22. päivän yövuorossa annettiin työnjohtajalle lupa käynnistää jalosteenjakaja, samaan aikaan oli kunnossapitoryhmällä prosessin laitteiston tarkistus kesken. [6]

Prosessi käynnistettiin matalalla kapasiteetilla, mutta silti pinnankorkeus nousi jakajassa nopeasti liian korkealle. Se laskettiin normaalitasolle hidastamalla syöttöjä, mutta se nousi hetken kuluttua uudelleen. Valvomossa prosessia käynnistänyt operaattori kuittasi pinnankorkeuden hälytyksen äänettömälle. Pinta jatkoi nousemistaan ja lopulta prosessi sammutettiin, jotta päivävuoro saisi käynnistää sen. Lisäksi yövuorossa huomattiin korvaavan kiinteän pinnankorkeusmittarin olevan epäkunnossa. [6]

Yövuoron loppuessa ei vuoronvaihtopalaverissa mainittu sanallakaan epäkuntoisesta mittarista, eikä sen huoltoa ollut tilattu. Yövuoro ei ollut myöskään merkannut epäkuntoista mittaria vuorolokiin. [6]

Päivävuorolaisten aloittaessa töitään kukaan ei tehnyt prosessinkäyttöohjeisiin merkattua tarkastusta, jossa prosessi olisi kuulunut edes kävellen kiertää läpi. [6]

Päivävuoro alkoi käynnistää prosessia varovaisesti ja kaikki sujui hyvin kunnes puolenpäivän jälkeen huomattiin jalosteenjakajan paineen nousseen huomattavasti yli normaalin käyttöpaineen. Valvomosta ilmoitettiin kohonneesta paineesta muille operaattoreille, joista kaksi lähti manuaalisesti avaamaan venttiiliä, jolla painetta saatiin laskettua. Toinen näistä operaattoreista huomasi höyryn kaltaista poistokaasua, mutta toinen operaattori sanoi sen olevan normaalia. [6]

Samaan aikaan oli jakajan lämpötila noussut 150 °C:een normaalin 135 °C sijasta, joka mallinnuksen mukaan höyrystää jakajan pohjatuotteita. [6]

Alueen esimiehiä, työnjohtajia ja prosessioperaattoreita kokoontui valvomoon pitämään neuvonpitoa havaituista poikkeustilanteista. Kukaan valvomossa olleista ei ollut tietoinen yövuoron kokemista vaikeuksista prosessin käynnistymisen yhteydessä. Neuvonpidossa päätettiin jakajasta tyhjentää raskasjäte, joka prosessista poistuessaan lämmitti lämmönvaihtimia, jotka lämmittivät syöttöä. Syötön lämpötila kasvoi nopeasti kaksinkertaiseksi, joka aiheutti syötön höyrystymistä ja siten jakajan olosuhteiden muutoksen. [6]

Tehdasalueen ylimääräisiä työntekijöitä oli kokoontunut palaveriin ISOM - prosessin lähellä olevaan väliaikaiseen toimistoon. Samoihin aikoihin alkoi edellä

mainittu syötön lämpötilan kohoaminen, joka johti pinnan korkeuden nousuun aina ylivuotolinjaan asti, joka nosti tornin painetta nopeasti. [6]

Hetki tämän jälkeen oli paine jo niin korkea, että prosessin varoventtiilit avautuivat ja päästivät painetta alasajosysteemiin. Ainakin kaksi silminnäkijää kertoi ilmoittaneensa radiolla korkealle kohoavasta kaasu- ja nestevuodosta, joka laskeutui maahan ja kerääntyi lammikoksi systeemin ympärille. [6]

Henkilöstö poistui välittömästi paikalta, hälytysjärjestelmän ääni ei varoittanut muita, sillä se oli kytketty yövuorossa äänettömälle. [6]

Purkautuneen nestelammikon lähelle nähtiin ajavan auto, jonka epäiltiin syyttäneen lammikon. Paikallaolijoiden mukaan tapahtui ainakin kaksi räjähdystä, joista jälkimmäinen oli huomattavasti suurempi ja äänekkäämpi. Räjähdyksessä vahingoitti lähelle pystytettyjä tilapäisiä rakennuksia, joista löytyi myöhemmin 15 menehtynyttä työntekijää. Räjähdyksessä aiheutti lukuisia hiilivetyvuotoja ja tulipaloja. [6]

#### 9.4 Syitä

Tutkinnassa kävi ilmi syitä onnettomuuden syntyyn, sekä sen seurauksiin vaikuttaneita tekijöitä. Näitä syitä ja tekijöitä olivat kaasu- ja nestevuoto prosessista, jalosteenjakajan käynnistyksen menetelmät ja siinä havaittujen ongelmien tiedonkulun puute, tehdasalueelle väärin sijoitetut tilapäiset rakennukset sekä alasajosysteemin suunnittelu ja toteutus. [6]

### **10 Finnish Chemicals Oy, Äetsä**

Lokakuun 31. päivänä 2005 yövuoron prosessinhoitaja oli aukaisemassa tukkeutunutta liuotussäiliön ja kuivaimen välistä yhdysputkea. Prosessinhoitaja havaitsi poikkeavia ääniä laitteista ja ajoi tehtaan välittömästi alas hätäpysäytyksellä. Välittömästi prosessinhoitajan poistuttua prosessitilasta oli siellä räjähtänyt. Onnettomuudessa ei menehtynyt yhtään henkilöä, mutta aineellisia vahinkoja aiheutui, jonka seurauksena toiminta keskeytyi pitkäksi aikaa. Onnettomuushetkellä oli heikkoa etelänpuoleista tuulta, eikä satanut. [7]

## 10.1 Tehdasalue

Finnish Chemicals Oy:n Äetsän tehdas sijaitsee Kokemäenjoen rannalla. Tehdasalueen länsipuolella sijaitsee yhtiön asuntoalue sekä Äetsän keskustataajama. Lähimpään kaupunkiin on matkaa noin 15 km. Hienokemikaalitehdas, jossa onnettomuus tapahtui, sijaitsee alueen länsilaidalla, tehdaskonttorin läheisyydessä. [7]

## 10.2 Prosessi

Tehtaan hienokemikaaliprosessi sisältää natriumboorihybridiliuoksen (SBH-liuos) valmistuksen ja kiinteän natriumboorihybridin (SBH-pulverin) valmistuksen. SBH-pulverin valmistus suoritetaan kahteen tilaan jakautuvassa omassa paloteknisessä prosessiosastossa. Sen pakkaus suoritetaan prosessiosastosta erotetussa omassa paloteknisessä osastossa, joka on jaettu kahteen osastoon sekin. Prosessiosastosta on lisäksi erotettu ristikytkentähuone tiilimuurauksella, jonka päällä on tiilimuurattu ohjaamo. Pulverituotanto on erotettu muusta tuotannosta Siporex-elementein. Hienokemikaalilaitoksen ohjaus tapahtuu pääasiassa päävalvomosta. [7]

Amiinia ja SBH:ta sisältävät laitteistot ja putkistot oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, tiivistemateriaalina käytettiin PTFE:tä. Vaikka säiliöt ja laitteet rakennettiin vähintään 2 bar käyttöpaineelle, niitä käytettiin paineettomina. Kuivain ostettiin valmiina saksalaiselta valmistajalta. Sen ylälaipan tiivistemateriaalin takia käytettiin laipassa korkeita puristusvoimia, jotta saataisiin aikaan riittävä kaasutiiveys. [7]

Prosessin hoitaminen oli ohjeistettu yksityiskohtaisesti normaalitoiminnassa. Myös joitakin häiriötilanteita oli ohjeistuksessa huomioitu, kuten putkiston tukkeutuminen. [7]

Ohjeistuksen mukaan tuli käyttää amiiniliuosta tai typellä puhaltamista tukkeuman aukaisemiseksi. Mikäli näistä ei olisi apua, tuli prosessi ajaa alas ja suorittaa amiinipesu. Kaikki nämä toiminnot on kirjallisesti ohjeistettu. Ohjeistuksissa ei oteta kuitenkaan kantaa veden käyttöön ja siihen liittyviin riskeihin. [7]

### 10.3 Tapahtumat ennen onnettomuutta

Perjantaina lokakuun 28. päivänä oli pakkaamossa sattunut tulipalo, jonka vuoksi pulverin tuotantoprosessi ajettiin alas. Tämän seurauksena olivat molemmat kuivaimet amiinipesty seuraavan viikonlopun aikana. [7]

Tulipalon jälkiä korjatessa oli kiinnitetty huomiota toisen kuivaimen luota tuleviin ääniin, jotka paikallistettiin kuivaimen vaihteiston laakeriin ja sekoittimen siipiin. [7]

Tuotanto aloitettiin uudestaan seisokin jälkeen sunnuntai-iltana. Maanantaina aamuvuoro totesi, ettei korjatusta pumpusta löydetty vikaa, vaikka sen oletettiin olevan epäkunnossa, koska se oli laukonut lämpörelettä. [7]

Iltavuoron prosessinhoitaja havaitsi kuivaimen väliputken käsiventtiilin olevan kiinni ja avannut sen. Hän ilmoitti vuoromestarille, että putki oli tukossa venttiilistä kuivaimelle saakka, jonka takia hän ajoi kuivaimen alas ja pyysi vuoromestarin paikalle. [7]

Prosessinhoitaja ja vuoromestari ajoivat yhdessä prosessin alas. Prosessinhoitajalle kerrottiin, ettei putken avaamiseen saa käyttää vettä tai höyryä. Vuoromestari käski muistuttamaan asiasta myös iltavuoron työntekijöille. Tukkeutunut väliputki oli tarkoitus avata, kunhan kuivaimet olisivat jäähtyneet ja liuotussäiliö olisi tyhjennetty. Lisäksi prosessinhoitajan tuli pestä kuivaimen ennen tukkeutuneen putken avaamista. Tukkeutunutta väliputkea yritettiin avata amiinilla ja typellä, mutta sitä ei saatu auki. [7]

Iltta- ja yövuoron työntekijät keskustelivat putken avaamisesta, jonka aikana kävi ilmi mahdollisesti myös veden käyttö. Venttiilin yläpuolelle oli todennäköisesti jäänyt paljon liukenematonta pulveria, sillä venttiili oli ollut kiinni kahden vuoron ajan. [7]

Yövuoron vuoromestari kävi iltavuoron vuoromestarin kanssa ensin akuutit tehtaan asiat läpi, jonka jälkeen he kävivät läpi kuivaimen tilanteen. Tilanne oli poikkeuksellinen siten, että kuivainta oli ajettu pitkään pohjaventtiili kiinni. Iltavuoron vuoromestari kertoi yövuoron vuoromestarille myös, että amiinipesu oli käynnissä ja kehotti olemaan varovainen sen kanssa. [7]

Yövuoron alettua työskenteli pulveritehtaalla vain prosessinhoitaja, joka lähti liuostehtaan valvomosta tekemään yleiskierroksen tehdassalissa. [7]

#### 10.4 Onnettomuuden kulku

Prosessin hoitaja saapui tukkeutuneelle kuivaimelle ja huomasi sen poikkeustilan. Kuivaimen pohjaventtiili oli jumiutunut hieman raolleen ja sen sekä liuotussäiliön välisen putken venttiili oli aukaistu liuotusta varten. Prosessinhoitaja sai idean liuottaa tukosta vedellä, ja laski vettä noin minuutin verran pienellä virtauksella putkeen. Samalla hän seurasi kädellä putken ja liuotussäiliön pintalämpötilaa eikä huomannut lämpötilan nousua. [7]

Prosessinhoitaja jatkoi veden ajoa putkeen, jonka jälkeen hän oli kuullut epänormaalia kohinaan kuivaimen yläosasta. Ääni oli muistuttanut typen laskemista ulos kovalla paineella. Hän sulki vesiventtiilin, koska ääni oli niin kova. [7]

##### 10.4.1 Räjähdyk

Tilanteen epänormaalius sai prosessinhoitajan hätä-pysäyttämään prosessin ja poistumaan tilasta juosten kohti viereistä kennosalia. Hän ehti noin 20 m päähän ennen kuin tapahtui räjähdys, jota prosessinhoitaja ei tunnistanut viereisestä

rakennuksesta. Hän jatkoi juoksemistaan vesikemikaalien valvomoon, jossa yleisvuoro mies hälytti palokunnan ja soitti vuoromestarille. [7]

Lähistöllä asunut henkilö kuuli tapahtuman kuluessa äänen, jonka hän kertoi kuulostaneen kaasun päästämiseltä ilmaan. Ikkunasta katsoessaan hän havaitsi koko alueen valaistuneen oranssilla valolla, jonka jälkeen seurasi räjähdys. [7]

### 10.5 Seurauksia

Räjähdyksessä kuivaimen kansi lensi ylöspäin laskeutuen piha-asfaltille. Kannen mukana lensi sekoittaja, jonka moottori tuli katon läpi pakkaustilaan. Kuivaimen rikkoutumisesta aiheutui myös lukuisia heitteitä ympäristöön. Paine rikkoi kuivaimen yläpäässä olevan putkiston, joka johti lauhduttimelle. [7]

Kuivaimen rikkoutumisesta seurasi vetyräjähdys prosessitilassa, jossa paineaalto rikkoi Siporex- elementtiseinät sekä kytkentähuoneen tiilimuuraukset. Lisäksi se hajotti kytkentähuoneen yläpuolella olevan ohjaamon lankalasi-ikkunat. [7]

Räjähdyksen voimasta kuivain tuli alaspäin noin 1,5 m, jonka lisäksi heitteet ja paineaalto rikkoivat ovia ja ikkunoita. Liuotussäiliön sisältö lensi ympäriinsä, sillä liuotussäiliön ja kuivaimen yhdistävän putkiston teflonpalje rikkoutui liuotussäiliössä tapahtuneen paineen nousun vuoksi. Lisäksi räjähdys sytytti bitumikaton sekä vedyn ulospuhallusputken pään palamaan. [7]

### 10.6 Syitä

Tutkinnassa todettiin tukoksen avaamisessa käytetyn veden menneen liuotussäiliöön, jossa se alkoi liuottaa sakkaa säiliön pohjalta. Syntynyt liuos reagoi SBH:n ja amiiniin kanssa, josta aiheutui voimakas kemiallinen reaktio, jota ei ollut pidetty mahdollisena. [7]

Sekoitusäiliön paine työnsi sekoitusäiliön sisällön kuivaimen raollaan olevan venttiilin läpi, jonka seurauksena yhdysputkessa oleva teflonpalje murtui. Tämän jälkeen putken sisältö pääsi reagoimaan kuivaimessa olleen amiinin ja SBH:n

kanssa, jonka seurauksen kuivaimen alkoi kehittyä lämpöä ja painetta, lähinnä vetyä. Pulveria painautui raollaan olevaa venttiiliä vasten, jonka vuoksi paine ei päässyt purkautumaan alakautta pois. Paineen nousu aiheutti kuivaimen yläpään pulttien ja lauhduttimiin menevien putkien rikkoutumisen. [7]

#### 10.6.1 Onnettomuutta edistäneet tapahtumat

SBH- pulverin kertyminen kuivaimen johtui vain hieman raollaan olleesta pohjaventtiilistä. Myös amiinia kertyi kuivaimen pesun yhteydessä. Typen poistoputken todettiin olevan tukossa laitetta avattaessa räjähdysen jälkeen. Jälkeenpäin todettiin myös, että liuotussäiliöstä kuivaimille johtavat linjat olivat tukossa. [7]

Liuotussäiliön pohjalle oli päässyt kertymään karbonaattisakkaa jopa 450 kg, koska prosessi ja liuotussäiliön sekoitus olivat olleet pysäytettyinä yli kaksi vuorokautta. [7]

Kuivaimen yläpäädyn pultit sekä yläosaan liittyvät putket pettivät noin 70–100 bar:n paineesta, joka ei päässyt purkautumaan normaalia kautta vesilukolle, johtuen. Paineen nousun seurauksena lauhduttimen putket menivät tukkoon. Vesilukolle meni kaasua paineen nousun alkuvaiheessa. [7]

Juuri ennen onnettomuutta vedyn ja amiinin pitoisuusmittarit hälyttivät. Tutkimusaineiston perusteella liuotussäiliön lämpötila oli noussut 23 °C:sta 115 °C:een noin kahden minuutin aikana. [7]

Lisäksi todettiin pesuohjeiden olleen puutteelliset, jotta ne olisivat ohjeistaneet mahdolliset vaaratekijät, kuten vedellä pesun. Laitoksella oli ollut aikaisemmin läheltä piti – tapauksia, sekä poikkeamia, joita ei ollut kirjattu, käsitelty eikä analysoitu riittävän tarkasti. [7]

## 11 Ekokem, Hanko

Ekokem Oy:n Hangossa sijaitsevalla liuotinhöyryjen käsittelylaitoksella tapahtui yhden työntekijän kuoleman aiheuttanut tulipesäräjähdys lokakuun 25. päivän iltana vuonna 2007. Kattilan tulipesän räjähdys sattui kattilan koekäytössä. [8]

### 11.1 Tehdasalue

Ekokem Oy:n liuotinhöyryjen (VOC)- käsittelylaitos sijaitsee Hangon kaupungissa Fermion Oy:n tehdasalueella. Fermion Oy on Orion- konsernin yhtiö, joka valmistaa lääkkeiden vaikuttavia aineita. [8]

### 11.2 Prosessi

VOC- käsittelylaitos tuottaa höyryä Fermion Oy:n prosessilaitteiden tarpeisiin sekä kiinteistöjen lämmittämiseen. Käsittelylaitos oli tarkoitus ottaa käyttöön lokakuun 2007 aikana. Laitoksessa olevaa höyrykattilaa oli mahdollisuus kaukokäyttää Riihimäellä sijaitsevasta valvomosta, mutta paikalla oli myös oma valvomonsa kattilalaitosrakennuksessa. [8]

VOC- laitoksen höyrykattilassa poltetaan Fermion Oy:n prosessista tulevia poistokaasuja sekä liuottimia, kuten metanolia ja tolueneita, mutta sen pääpolttoaineena on raskas polttoöljy. VOC- laitoksella varastoidaan raskasta polttoöljyä 50 m<sup>3</sup> säiliössä sekä liuottimia 5 m<sup>3</sup> säiliöissä. [8]

Liuotinhöyryjenkäsittelylaitoksen kattilalaitoksen toimittaja oli Rinheat Oy, joka myös vastasi laitoksen suunnittelusta sekä käyttöönotosta. Rinheat Oy palkkasi asiantuntijoita tekemään tarpeen mukaan erityistöitä sekä käytti muita alihankkijoita. [8]

### 11.3 Onnettomuuden kulku

VOC- laitoksella tehtiin ympäristöluvan mukaisia päästömittauksia normaaleissa käyttöolosuhteissa. Näissä mittauksissa mitattiin savukaasujen pitoisuuksia, jotka syntyvät höyrykattilan käytöstä. [8]

Onnettomuushetkellä paikalla oli kolme koeajaosta vastaavaa henkilöä, joidenka lisäksi paikalla oli myös kolme henkilöä, jotka suorittivat varsinaiset päästömittaukset. [8]

Aamulla klo 8.30 käynnistettiin kattilalaitoksen höyrykattila normaalisti polttoöljyllä. Liuottimien poltto aloitettiin iltapäivällä, mutta se keskeytyi polttimien pysähtyessä noin 3 minuuttia polton aloittamisesta. Heti tämän jälkeen sytytettiin polttoöljypoltin ja yritettiin liuotinpoltoa uudestaan. Liuotinpolton alkaessa johdettiin VOC- kaasut polttoon klo 13.25, jonka jälkeen koeajo jatkui keskeytymättä iltaan asti. [8]

Päästömittauksen suorittaneet mittaajat keräsivät varusteensa ja laitteensa mittausten loputtua klo 20.35, jolloin liuotinpoltto lopetettiin. Polton lopettaminen tapahtui valvomosta käsin pysäyttämällä syöttöpumppu ja sulkemalla venttiilit. Tämän jälkeen avattiin liuotinlinjan huuhteluventtiili noin 1,5 min ajaksi, kunnes se suljettiin samanaikaisesti hajotusilman tulon sulkemisen kanssa. [8]

VOC- kaasut ohjautuivat ohituksen kautta savupiippuun polttoöljypolttimen pysäytyksen alettua klo 20.40. Öljypoltin pysähtyi parin minuutin kuluttua ja valvomossa oleva tietokone pysäytettiin klo 20.46. [8]

Ekokem Oy:n projekti-insinööri saapui klo 20.50 valvomoon ja ilmoitti, että liuotuslinjan puhallusventtiilin linjassa ennen puhallusventtiiliä oleva käsisulkuventtiili oli ollut kiinni, eikä liuotimen puhallus ollut onnistunut. Projekti-insinööri sanoi, että puhallus tehtäisiin manuaalisesti uudelleen. [8]

Valvomon tietokone käynnistettiin puhalluksen uudelleen suorittamisen vuoksi, kenellekään ei tullut mieleen öljyliekin uudelleen sytyttäminen. Projekti-insinööri pyysi kattilalaitoksen automaatiojärjestelmän toimittaneen yhtiön insinööriä avaamaan puhallusventtiilin hetken kuluttua, kun hän itse menisi avaamaan kattilahuoneeseen käsisulkuventtiiliä ja katsomaan kattilan takapäädystä olevasta näkölasista miltä tulipesässä näyttää. [8]

### 11.3.1 Räjähdykset

Noin 10 sekunnin kuluttua projekti-insinöörin lähdöstä, avasi insinööri puhalluksen, jonka seurauksena tapahtui tulipesäräjähdykset. Tulipesäräjähdykset johtui liuottimen ja paineilman seoksen nopeasta kasaantumisesta, joka syttyi klo 20.52. [8]

Tulipesäräjähdyksen seurauksena kattilan räjähdysluukku iskeytyi juuri luukun kohdalla seissyttä projekti-insinööriä päin, joka menehtyi välittömästi. Vielä paikalla olleet päästömittaajat seisoivat kattilan sivulla, eivätkä loukkaantuneet. Räjähdykseluukku jäi roikkumaan yhden saranan varaan toisen saranan rikkouduttua. Kattilan eristykset sekä suojapellitykset vaurioituivat, lisäksi savukanavat kärsivät vahinkoja ja kattilahuoneen seinäelementit siirtyivät ja vääntyivät. [8]

Paikalla olleet päästömittaajat poistuivat tilasta välittömästi räjähdysten jälkeen, he säilyivät käytännössä vahingoittumattomina. Kattila oli ohjattu turvalliseen tilaan turvalogiikan toimesta. Valvomossa olleet kaksi muuta henkilöä kiirehtivät kattilahuoneeseen räjähdysten jälkeen, huone oli täynnä pölyä ja savua, joka heikensi näkyvyyttä. He lähtivät kiertämään rakennusta ulkokautta ja havaitsivat maassa makaavan projekti-insinöörin. He hälyttivät paikalle pelastuslaitoksen ja ambulanssin, mutta projekti-insinöörin hengen pelastamiseksi ei ollut mitään tehtävissä. [8]

## 11.4 Syitä

Tutkinnassa paljastui erilaisia onnettomuuden syntyyn vaikuttaneita syitä. Johtamismenettelyissä havaittiin puutteita, henkilöiden toiminta oli puutteellista ja lisäksi oli olemassa teknisiä tekijöitä, jotka vaikuttivat onnettomuuden kulkuun. [8]

### 11.4.1 Johtaminen

Höyrykattilan tulipesäräjähdyksen syntyyn vaikuttivat tilaajan sekä toimittajan epätietoisuudet koekäytön aikaisesta toiminnasta. Tilaajan ja toimittajan olisi tullut sopia koekäytön valvojasta sekä vastuuhenkilöstä. Johtamismenettelyt vaikuttivat sekavilta, sillä tutkinnassa syntyi sellainen kuva, ettei töitä valvonut kukaan. [8]

#### 11.4.2 Tekniset tekijät

Kattilalaitoksen ohjeistuksessa ei kaikkia käytönaikaisia vaaratilanteita ollut tunnistettu. Ohjeistuksessa ei ollut riittävästi esitetty tarpeellisia tietoja turvallisesta käynnistämisestä, käytöstä eikä alasajosta, lisäksi koekäytön aikainen toiminta olisi pitänyt ohjeistaa tarkemmin. [8]

Linjaan oli asennettu käsikäyttöinen sulkuventtiili huoltotöitä helpottamaan, mutta valvomo ei saanut tietoa venttiilin asennosta, joka olisi ollut erittäin tärkeää prosessin turvallisuuden kannalta. [8]

Räjähdyksen voimakkuuteen vaikuttava tekijä oli polttimelle johtavan putken pituus, joka sisälsi noin kaksi litraa liuottimia. Putken pituudeksi arvioitiin noin 7 metriä. [8]

Kattilan käyttöohjeissa kiellettiin oleskelemasta kattilan polttimien luona tai luukkujen läheisyydessä kattilan sytytyshetkellä. Räjähdyksiluukun lähellä seisominen on vaarallista myös kattilan käytön aikana, puhumattakaan kattilan ylös- ja alasajoista. [8]

Näkölasi oli sijoitettu keskelle räjähdysluukkua, joka ei ole turvallinen paikka sille, sillä luukun tarkoitus on mm. ylipaineen purkaminen häiriötilanteissa. Kattilan käyttöohjeissa ei mainita mitään näkölasin käytöstä. [8]

#### 11.4.3 Toiminta

Kukaan ei oivaltanut toteutettuun huuhteluun liittyviä vaaratekijöitä, eikä toiminta ollut käyttöohjeiden mukaista. Lisäksi kiireinen työtahti ja myöhäinen ajankohta vaikuttivat heikentävästi toimintatapoihin. [8]

## 12 Yhteenveto

Tätä työtä tehdessä tutustuin erilaisiin ja omalla tavallaan erittäin mielenkiintoisiin onnettomuuskuvauksiin. Kaikista tapahtuneista onnettomuuksista on löytynyt valtava määrä opittavaa, jotta luontaista turvallisuutta saataisiin parannettua jatkuvasti, myös muilla aloilla.

Tässä kandidaatintyössä käsitellyissä tapauksissa oli paljon yhteisiä piirteitä, riippuen tapahtuman ajankohdasta. Vanhemmissa tapauksissa olivat suurimmat syyt prosessien sijoittamisessa väärään paikkaan, kuten asutuksen lähelle, sekä puutteellisissa turvalaitteissa. Lisäksi työntekijöiden huolimattomuus ja välinpitämättömyys olivat suuressa osassa onnettomuuksiin johtaneissa tekijöissä.

Aivan tuoreimmat tapaukset olivat enemmänkin inhimillisen virheen seurauksia, joita ei olisi voitu välttää tavallisilla turvalaitteilla, jotka ihminen pystyy kiertämään. Teollisuusrakentaminen onkin ottanut hyvin oppia historiasta, mutta edelleen pitäisi ajatella hieman enemmän tulevaa, ja mitä mahdollisesti saattaa tapahtua.

Käsitellyistä tapauksista pystytään jakamaan onnettomuuden pääsyyt kolmeen kategoriaan; suunnitteluvirheet, käyttövirheet sekä laiteviat. Monessa tapauksessa ei voida yksiselitteisesti todeta yhtä ainutta syytä, mutta karkeasti laskien voidaan syyt jakaa suhteessa 2:7:1. Eli käyttövirheet olivat selkeästi suurin tekijä onnettomuuksien syntyyn.

Teollisuudessa tulee aina tapahtumaan onnettomuuksia ja vahinkoja, sillä ihmisen toiminnat antavat mahdollisuuden inhimilliseen virheeseen, joka usein on syynä onnettomuuksiin. Varsinkin nykypäivänä on otettu niin hyvin opiksi aiemmista onnettomuuksista, että laitevioista tms. syistä johtuvia onnettomuuksia sattuu todella harvoin. Maissa, joissa on korkea turvallisuuskulttuuri, tulisikin

teollisuuden keskittyä onnettomuuksien seurauksien pienentämiseen sekä nopeaan reagointiin onnettomuustilanteissa.

### 13 Lähteet

1. Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, Vol 3, 2<sup>nd</sup> edition, Lees, Frank P., Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1996, appendix 2-5
2. Explosion and fire at the Phillips company Houston chemical complex, Pasadena, TX, Robert M. Bethea, Chemical Engineering Department, Texas Tech University, Lubbock, TX 79409-3121
3. U.S. Fire Administration/Technical Report Series, Phillips Petroleum Chemical Plant Explosion and Fire, Pasadena, Texas, USFA-TR-035/October 1989, s. 1-2
4. Onnettomuustutkintakeskus, tutkintaselostus B 5/2003 Y, Räjähdyksmäinen tulipalo terästehtaalla Torniossa 19.9.2003, Multiprint Oy, Helsinki 2005, luonnos 10.6.2005, s. 1-82
5. Turvatekniikan keskus, onnettomuustutkintaraaportti, Dnro 1062/36/2004, Vetyräjähdys ksyloosin hydraulilaitoksella 13.1.2004, s. 1-13
6. FATAL ACCIDENT INVESTIGATION REPORT, Isomerization Unit Explosion Final Report, Texas City, Texas, USA, Date of Incident: March 23, 2005, Date of Report: December 9th 2005, s. 1-168
7. Turvatekniikan keskus, Onnettomuustutkintaraaportti, Dnro 4381/06/2005, Kuivaimen räjähdys Finnish Chemicals Oy:n pulveritehtaalla, s. 1-26
8. Turvatekniikan keskus, Onnettomuustutkintaraaportti, dnro 4006/06/2007, 18.2.2008, Ekokem Oy:n VOC- käsittelylaitoksessa 25.10.2007 sattuneen kattilan tulipesän räjähdys, s. 3-9