



**ANALISIS POTENSI BAHAYA *METAL DUST EXPLOSION*
DI PT X (DENGAN MENGGUNAKAN METODE
FAULT TREE ANALYSIS)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar Sarjana Kesehatan Masyarakat

Disusun oleh:
Nurida Choirinisa Arfiyana
NIM 6411413152

**JURUSAN ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
FAKULTAS ILMU KEOLAHRAGAAN
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2019**

ABSTRAK

Nurida Choirinisa Arfiyana

Analisis Potensi Bahaya *Metal Dust Explosion* di PT X (dengan Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis*)

VI + 253 halaman + 29 tabel + 69 gambar + 16 lampiran

Studi kasus terdahulu menunjukkan terjadinya kasus *dust explosion* besar yang menyebabkan kerugian pada industri di dunia. Selama satu dekade terakhir, hampir setiap tahun di dunia terjadi kasus *dust explosion* oleh debu logam. PT X adalah sebuah perusahaan baja yang pernah mengalami ledakan pada tahun 2004 dan 2017. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya *metal dust explosion* menggunakan metode *fault tree analysis* di PT X.

Jenis penelitian ini adalah penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) level 1. Instrumen yang digunakan adalah lembar proses produksi dan lembar tabel identifikasi awal FTA dengan validasi desain menggunakan penilaian dari ahli.

Hasil menunjukkan adanya mode kesalahan berisiko sangat tinggi *dust explosion* sebanyak 31,6% pada pembuatan *billet* baja. Berdasarkan *fault tree analysis* didapatkan penyebab dasar *metal dust explosion* terbanyak adalah kurangnya biaya dan kurangnya informasi yang masing-masing sebesar 6,5%.

Penelitian ini menyarankan pada pembuat kebijakan perusahaan untuk melakukan pencegahan dan pengendalian *dust explosion* di perusahaan, seperti: penyediaan anggaran, pembuatan desain bangunan yang meminimalisasi adanya akumulasi debu, pembersihan yang baik, pembuatan kebijakan dan prosedur terkait pencegahan *dust explosion*, pengadaan edukasi keselamatan bagi pihak manajemen dan pelatihan untuk pekerja tentang bahaya *dust explosion*, pemasangan *safety sign*, dan penyediaan APD yang tahan terhadap ledakan.

Kata kunci: *dust explosion, fault tree analysis*

Kepustakaan: 60 (1991-2018)

ABSTRACT

Nurida Choirinisa Arfiyana

Metal Dust Explosion Hazard Potential Analysis at PT X (Using *Fault Tree Analysis Method*)

VI + 253 pages + 29 tables + 69 pictures + 16 attachments

Prior case studies showed some of dust explosion cases which left a great loss for industries in the world. Over this last decade, nearly every year in the world, dust explosion caused by metal dust happened. PT X was a steel manufacture which had explosion cases happened on 2004 and 2017. The objective of this research was to identify and evaluate metal dust explosion hazard potential using fault tree analysis method at PT X.

This research was research and development (R&D) level 1. The instruments used were production process sheet and table of identification sheet with help of the expert as a design evaluator.

Result showed 31,6% of fault modes in steel billet production had extreme risk of dust explosion. Fault tree analysis obtained most of metal dust explosion basic event was lack of fund and information with percentage of each were 6,5%.

This research recommended to manufacture administrator to do dust explosion prevention and mitigation, such as: dust explosion prevention budget accommodation, design minimum dust accumulation manufacture building, good housekeeping, establish dust explosion prevention policies and procedures, conduct safety education for administrators and training for employees about dust explosion hazard, conduct safety sign installation, and supply explosive-proof protective equipment.

Keywords: dust explosion, fault tree analysis

Literatures: 60 (1991-2018)

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam pustaka.

Semarang, 8 Juli 2019

Penulis,



Nurida Choirinisa Arfiyana
NIM 6411413152

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Analisis Potensi Bahaya *Metal Dust Explosion* di PT X (dengan Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis*)" yang disusun oleh Nurida Choirinisa Arfiyana, NIM 6411413152 telah dipertahankan di hadapan Panitia ujian pada Ujian Skripsi Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Keolahragaan, Universitas Negeri Semarang, yang dilaksanakan pada:

hari, tanggal : Selasa, 18 Juni 2019

tempat : Ruang Ujian Skripsi Jurusan IKM B

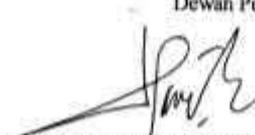


Prof. Dr. Wilkyo Rahayu, M.Pd.
NIP 196103201984032001

Panitia Ujian

Sekretaris,

Muhammad Azinar, S.KM., M.Kes.
NIP 198205182012121002

	Dewan Penguji	Tanggal
Penguji I	 dr. Anik Setyo Wahyuningsih, M.Kes. NIP 197409032006042001	2/7 2019
Penguji II	 Evi Widowati, S.KM., M.Kes. NIP 198302062008122003	5/7 - 2019
Penguji III	 Galuh Nita Frameswari, S.KM., M.Si. NIP 198006132008122002	8/7 - 2019

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO:

“Have fun, even if it’s not the same fun everyone else is having” – C.S. Lewis

“There is nothing good or bad, but thinking makes it so” – Hamlet

PERSEMBAHAN

Karya ini Penulis persembahkan untuk:

1. Ibunda (T. Aryati) dan Ayahanda
(Bambang Kustiyono)
2. Almamater Universitas Negeri
Semarang

PRAKATA

Puji syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penyusunan skripsi yang berjudul “Analisis Potensi Bahaya *Metal Dust Explosion* di PT X (dengan Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis*)” ini dapat terselesaikan. Skripsi ini dibuat guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Kesehatan Masyarakat di Universitas Negeri Semarang.

Sehubungan dengan pelaksanaan penelitian hingga penyusunan skripsi ini, rasa terima kasih yang tulus Penulis sampaikan kepada yang terhormat:

1. Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas Ilmu Keolahragaan Universitas Negeri Semarang, Ibu Dr. Setya Rahayu, M.S., atas ijin penelitian.
2. Ketua Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat Fakultas Ilmu Keolahragaan Universitas Negeri Semarang, Bapak Irwan Budiono, S.KM., M.Kes (Epid), atas persetujuan penelitian.
3. Pembimbing I, Ibu Evi Widowati, S.KM., M.Kes., atas bimbingan, arahan, serta motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
4. Pembimbing II, Ibu Galuh Nita Prameswari, S.KM., M.Si., atas bimbingan, arahan, serta motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
5. Penguji, dr. Anik Setyo Wahyuningsih, M.Kes., atas saran dan masukan dalam perbaikan skripsi ini.
6. Staf Pengajar dan Staf Administrasi Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, atas dukungan dan bantuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Dy. Manager HR & GA PT X, Bapak Agus Purwantoro, SE., atas ijin praktik kerja industri dan ijin penelitian.
8. Dy. General Manajer PT X, Bapak Agus Barliandi, atas ijin penelitian.
9. Assisstant Manajer PT X, Bapak Irwan Agung Satrianto, atas ijin penelitian dan bantuan dalam pengambilan data.
10. Staf SHE PT X, Bapak Arif Setiawan, Bapak Wawan, Bapak Faukal, Ibu Hanif Mufidah, dan Ibu Rasma, atas bimbingan dan bantuan dalam pengambilan data.
11. Kasi Pelayanan Teknis Balai Keselamatan Kerja Provinsi Jawa Tengah, Dr Suddarma, S.Si., M.Si., atas kesediaannya menjadi validator dalam penyusunan skripsi ini.
12. Kedua orang tua dan adikku terkasih, atas doa, cinta, pengorbanan, ketulusan, bantuan, dan motivasinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
13. Sahabat terbaik Evanda Vimalasari Ramadina, atas doa, dukungan, dan motivasinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

14. Sahabat seperjuangan Dian, Muna, Anna, Devi, Anggi, dan rekan seimbang, atas doa, bantuan, semangat, dan motivasinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
15. Rekan Ilmu Kesehatan Masyarakat 2013.
16. Semua pihak yang terlibat selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari adanya kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan skripsi ini. Maka dari itu, saran dan masukan yang bersifat membangun sangat Penulis harapkan demi perbaikan skripsi ini.

Semarang, 8 Juli 2019



Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	8
1.3 TUJUAN PENELITIAN	8
1.4 MANFAAT HASIL PENELITIAN.....	8
1.4.1 Bagi Pihak Perusahaan	8
1.4.2 Bagi Institusi Pendidikan	8
1.4.3 Bagi Peneliti	8
1.5 KEASLIAN PENELITIAN	9
1.6 RUANG LINGKUP PENELITIAN.....	10
1.6.1 Ruang Lingkup Tempat.....	10
1.6.2 Ruang Lingkup Waktu	10

1.6.3 Ruang Lingkup Keilmuan	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 LANDASAN TEORI.....	11
2.1.1 <i>Dust Explosion</i>	11
2.1.2 Analisis Bahaya <i>Dust Explosion</i>	33
2.2 KERANGKA TEORI	39
BAB III METODE PENELITIAN	40
3.1 ALUR PIKIR	40
3.2 FOKUS PENELITIAN	41
3.3 JENIS DAN RANCANGAN PENELITIAN.....	41
3.4 SUMBER INFORMASI	42
3.5 INSTRUMEN PENELITIAN DAN TEKNIK PENGAMBILAN DATA	43
3.5.1 Instrumen Penelitian.....	43
3.5.2 Teknik Pengambilan Data	44
3.6 PROSEDUR PENELITIAN.....	47
3.6.1 Potensi dan Masalah.....	47
3.6.2 Pengumpulan Data	47
3.6.3 Desain Awal Produk	48
3.6.4 Validasi Desain	48
3.6.5 Desain Teruji.....	48
3.7 TEKNIK ANALISIS DATA.....	49
3.7.1 Penyajian Data	49
3.7.2 Penarikan Simpulan dan Verifikasi.....	49

BAB IV HASIL PENELITIAN.....	50
4.1 GAMBARAN UMUM	50
4.2 HASIL PENELITIAN.....	60
BAB V PEMBAHASAN	147
5.1 ANALISIS POTENSI BAHAYA	147
5.2 KELEMAHAN PENELITIAN	179
BAB VI PENUTUP	180
6.1 SIMPULAN	180
6.2 SARAN	181
DAFTAR PUSTAKA	187
LAMPIRAN	193

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Penelitian-Penelitian yang Relevan dengan Penelitian Ini.....	9
Tabel 2.1 Sistem Klasifikasi Debu German	13
Tabel 2.2 Simbol Pohon Kegagalan	37
Tabel 4.1 Karakteristik Responden	60
Tabel 4.2 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Raw Material Charging</i>	61
Tabel 4.3 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem EAF	64
Tabel 4.4 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem LRF	70
Tabel 4.5 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Alloy Feeding</i>	76
Tabel 4.6 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem CCM.....	83
Tabel 4.7 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Dust Collector</i>	89
Tabel 4.8 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Housekeeping</i> Kondisi Gedung	99
Tabel 4.9 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Housekeeping</i> Pemeliharaan Gedung	109
Tabel 4.10 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem <i>Housekeeping</i> Pemeliharaan Mesin	118
Tabel 4.11 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem Penyimpanan Bahan Baku	125
Tabel 4.12 Identifikasi Potensi Bahaya pada Sistem Penyimpanan <i>Billet</i> Baja.....	134

Tabel 4.13 Kriteria Tingkat Kemungkinan (<i>Likelihood</i>).....	138
Tabel 4.14 Kriteria Tingkat Konsekuensi (<i>Consequence</i>)	138
Tabel 4.15 Kriteria Tingkat Risiko (<i>Risk</i>)	139
Tabel 4.16 Simbol-Simbol <i>Fault Tree Analysis</i>	140
Tabel 4.17 Penilaian Pakar terhadap Desain <i>Template FTA</i>	141
Tabel 4.18 Penilaian Pakar terhadap Komponen Konstruksi Bagan FTA (Simbol FTA)	142
Tabel 4.19 Penilaian Pakar terhadap Komponen Konstruksi Bagan FTA (Pengisian Simbol FTA).....	143
Tabel 4.20 Penilaian Pakar terhadap Komponen Penilaian Desain FTA.....	144
Tabel 4.21 Rekapitulasi Validasi Desain Produk FTA	145
Tabel 5.1 Rekapitulasi Penyebab Sekunder <i>Metal Dust Explosion</i> dari Keseluruhan Sistem Pembuatan <i>Billet</i> Baja.....	148
Tabel 5.2 Rekapitulasi Penyebab Dasar <i>Metal Dust Explosion</i> dari Keseluruhan Sistem Pembuatan <i>Billet</i> Baja.....	150
Tabel 5.3 Simbol dan Komponen Penghitungan <i>Minimal Cut Set</i>	152
Tabel 5.4 Aljabar Boolean untuk <i>Minimal Cut Set</i>	155
Tabel 5.5 Penyebab Dasar Berdasarkan Hasil Penghitungan <i>Minimal Cut Set</i>	159

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Dust Explosion</i> Sekunder.....	14
Gambar 2.2 Kerangka Teori	39
Gambar 3.1 Alur Pikir Penelitian	40
Gambar 3.2 Langkah-langkah Penelitian R&D Level 1 (Hanya Meneliti Tidak Memproduksi dan Menguji Coba).....	47
Gambar 4.1 Proses Produksi Pembuatan <i>Billet</i> Baja.....	51
Gambar 4.2 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem <i>Raw Material Charging</i>	62
Gambar 4.3 Bagan FTA Berat <i>Bucket</i> Melebihi Daya Angkat <i>Crane</i>	62
Gambar 4.4 Bagan FTA <i>Bucket</i> Bergerak dalam Kondisi Tidak Stabil.....	63
Gambar 4.5 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem EAF.....	66
Gambar 4.6 Bagan FTA Suhu Ruangan EAF Terlalu Tinggi	66
Gambar 4.7 Bagan FTA Tegangan Listrik Terlalu Tinggi.....	67
Gambar 4.8 Bagan FTA Masuknya Debu Logam ke dalam Mesin	68
Gambar 4.9 Bagan FTA Penuangan <i>Scrap</i> Tidak Tepat di Atas <i>Furnace</i> ..	69
Gambar 4.10 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem LRF.....	72
Gambar 4.11 Bagan FTA Suhu Ruangan LRF Terlalu Tinggi.....	73
Gambar 4.12 Bagan FTA Adanya Akumulasi Debu pada Permukaan Troli.....	74
Gambar 4.13 Bagan FTA Adanya Akumulasi Debu pada Permukaan Rel	75

Gambar 4.14 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem <i>Alloy Feeding</i>	78
Gambar 4.15 Bagan FTA <i>Conveyor</i> Kotor dan Berdebu	79
Gambar 4.16 Bagan FTA Masuknya Komponen Asing ke dalam <i>Conveyor</i>	80
Gambar 4.17 Bagan FTA Tegangan Listrik Terlalu Tinggi.....	81
Gambar 4.18 Bagan FTA Suhu Ruangan Terlalu Tinggi.....	82
Gambar 4.19 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem CCM	84
Gambar 4.20 Bagan FTA Suhu Ruangan CCM Terlalu Tinggi.....	85
Gambar 4.21 Bagan FTA Masuknya Debu Logam ke dalam <i>Ladle</i>	86
Gambar 4.22 Bagan FTA Adanya Akumulasi Debu pada Permukaan <i>Ladle</i>	87
Gambar 4.23 Bagan FTA Mesin Pencetak Kotor dan Berdebu	88
Gambar 4.24 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem <i>Dust Collector</i>	91
Gambar 4.25 Bagan FTA Kerusakan Mekanik <i>Bag House</i>	92
Gambar 4.26 Bagan FTA Terdapat Sumbatan oleh Endapan Debu.....	94
Gambar 4.27 Bagan FTA Tidak Terpasang <i>Safety Device</i>	95
Gambar 4.28 Bagan FTA <i>Spark Detector</i> Tidak Berfungsi	96
Gambar 4.29 Bagan FTA Debu pada <i>Pelletizer</i> Tidak Diambil Seluruhnya	97
Gambar 4.30 Bagan FTA <i>Blower</i> Tidak Berfungsi.....	98
Gambar 4.31 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem	

<i>Housekeeping</i> Kondisi Gedung.....	101
Gambar 4.32 Bagan FTA Dinding, Lantai, dan Atap Kotor	102
Gambar 4.33 Bagan FTA Gedung Tertutup atau Tidak Memiliki Ventilasi	103
Gambar 4.34 Bagan FTA Desain Gedung Memungkinkan Terjadinya Akumulasi Debu	104
Gambar 4.35 Bagan FTA Akumulasi Debu di Udara Tinggi.....	104
Gambar 4.36 Bagan FTA Instalasi Listrik Tidak Sesuai Standar.....	106
Gambar 4.37 Bagan FTA Terdapat Bahan Mudah Terbakar Selain Bahan Produksi atau Sumber Api di dalam Gedung.....	107
Gambar 4.38 Bagan FTA <i>Layout</i> Tidak Memperhatikan Pemisahan Bahan Mudah Terbakar dan Sumber Panas	108
Gambar 4.39 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem <i>Housekeeping</i> Pemeliharaan Gedung.....	111
Gambar 4.40 Bagan FTA Pembersihan Gedung Tidak Dilakukan Secara Rutin	112
Gambar 4.41 Bagan FTA Pembersihan Gedung Tidak Dilakukan Secara Menyeluruh.....	113
Gambar 4.42 Bagan FTA Tidak Ada Pembersihan Debu Setelah Proses Produksi	114
Gambar 4.43 Bagan FTA Pembersihan Tidak Menggunakan Alat Khusus Penyedot Debu	115
Gambar 4.44 Bagan FTA Inspeksi Kebersihan Tidak Dilakukan	

Secara Rutin	116
Gambar 4.45 Bagan FTA Tidak Ada Tanda Larangan Merokok atau Membawa Sumber Api di Sekitar Gedung	117
Gambar 4.46 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem <i>Housekeeping</i> Pemeliharaan Mesin	119
Gambar 4.47 Bagan FTA Pembersihan Mesin Tidak Dilakukan Secara Rutin	120
Gambar 4.48 Bagan FTA Pembersihan Mesin Tidak Dilakukan Secara Menyeluruh.....	121
Gambar 4.49 Bagan FTA Pembersihan Mesin Tidak Menggunakan Alat Khusus Penyedot Debu	122
Gambar 4.50 Bagan FTA Inspeksi Kebersihan Mesin Tidak Dilakukan	123
Gambar 4.51 Bagan FTA Tidak Ada Tanda Larangan Merokok atau Membawa Sumber Api di Sekitar Mesin	124
Gambar 4.52 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem Penyimpanan Bahan Baku	127
Gambar 4.53 Bagan FTA Bahan Baku yang Disimpan Dapat Mengalami <i>Self-Ignition</i>	128
Gambar 4.54 Bagan FTA Permukaan Lantai Penempatan Bahan Baku Kotor dan Berdebu	129
Gambar 4.55 Bagan FTA Permukaan Dinding dan Atap Berdebu dan Kotor	130
Gambar 4.56 Bagan FTA Desain Atap Berbentuk Segitiga.....	130

Gambar 4.57 Bagan FTA Gudang Tidak Memiliki Ventilasi	131
Gambar 4.58 Bagan FTA Gudang Bersebelahan dengan Gedung Produksi yang Menghasilkan Panas	132
Gambar 4.59 Bagan FTA Korsleting Listrik Gudang Bahan Baku.....	132
Gambar 4.60 Bagan FTA Lampu Terbakar di Gudang Bahan Baku	133
Gambar 4.61 Bagan FTA <i>Metal Dust Explosion</i> pada Sistem Penyimpanan <i>Billet</i> Baja	135
Gambar 4.62 Bagan FTA Korsleting Listrik di <i>Billet Bay</i>	135
Gambar 4.63 Bagan FTA Permukaan Alas untuk Penempatan <i>Billet</i> Berdebu	136
Gambar 4.64 Bagan FTA Lampu Terbakar di <i>Billet Bay</i>	137
Gambar 4.65 Desain Konstruksi <i>Fault Tree Analysis</i>	139

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Pembimbing.....	193
Lampiran 2. Surat Ijin Penelitian	194
Lampiran 3. Surat <i>Ethical Clearance</i>	195
Lampiran 4. Bukti Penelitian	196
Lampiran 5. Lembar Formulir Validasi Desain	197
Lampiran 6. Lembar Validasi Desain dengan Dosen K3 Universitas Negeri Semarang.....	199
Lampiran 7. Lembar Validasi Desain dengan Kasi Pelayanan Teknis Balai Keselamatan Kerja Provinsi Jawa Tengah	201
Lampiran 8. Instrumen Penelitian	203
Lampiran 9. Desain Atap	205
Lampiran 10. <i>Flow Chart</i> MSDS	206
Lampiran 11. <i>Safety Sign</i>	208
Lampiran 12. Hasil Analisis Bahaya Menggunakan Metode <i>Fault Tree Analysis</i>	211
Lampiran 13. <i>Minimal Cut Set</i> dari Hasil Analisis Bahaya Menggunakan Metode <i>Fault Tree Analysis</i>	216
Lampiran 14. Hasil Wawancara	221
Lampiran 15. Dokumentasi	227
Lampiran 16. Desain Final <i>Fault Tree Analysis</i>	228

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Dust explosion atau ledakan debu merupakan suatu ledakan yang dipicu oleh material *combustible dust* (debu mudah terbakar) yang tersuspensi di udara dalam sebuah ruang tertutup dan terpapar oleh sumber panas (Eckhoff, 2003; CSB, 2006). *Combustible dust* sendiri adalah partikulat halus mudah terbakar yang pada rentang konsentrasi tertentu dapat menimbulkan bahaya nyala api atau ledakan apabila tersuspensi di udara atau proses spesifik media oksidasi lainnya (Wulandari dkk., 2006).

Dust explosion adalah suatu insiden besar yang dapat menyebabkan kerugian. Insiden ini dapat terjadi dalam dua tahap ledakan, yaitu ledakan primer dan sekunder. Ledakan sekunder tersebut menghasilkan kerusakan lebih besar dibandingkan dengan ledakan primer dikarenakan adanya peningkatan konsentrasi dan jumlah dari debu yang tersuspensi di udara (NCDOL, 2012).

Selayaknya ledakan, *dust explosion* hanya dapat terjadi jika seluruh elemen dalam *explosion pentagon* terpenuhi. Elemen tersebut adalah bahan bakar yang berupa: *combustible dust*, oksigen di udara, sumber ignisi, suspensi partikulat debu di udara pada jumlah dan konsentrasi tertentu, dan ruang terbatas seperti: mesin dan gedung yang dapat meningkatkan tekanan untuk memicu ledakan. Apabila salah satu dari elemen tersebut tidak tersedia, maka *dust explosion* tidak akan terjadi (CSB, 2006).

Dust explosion pada umumnya muncul dari pelepasan panas secara cepat yang terjadi dalam reaksi kimia berupa bahan bakar dan oksigen menjadi oksida dan panas. Dalam hal ini, hanya material dengan oksida tidak stabil yang dapat menyebabkan *dust explosion*. Beberapa material tersebut di antaranya adalah material organik (seperti: gula, tepung, linen, biji padi, dll), material organik sintetis (seperti: plastik, pestisida, dll), batu bara, dan logam (seperti: aluminium, magnesium, seng, besi, dll) (Eckhoff, 2003). Selama beberapa dekade terakhir, lebih dari setengah jumlah kasus *dust explosion* yang terjadi disumbangkan oleh industri dengan jenis material tersebut.

Menurut hasil analisis Yuan et al. (2015), pada tahun 1785-2012 telah terjadi kasus *dust explosion* di dunia sebanyak 2.870 kasus, dimana 1.611 kasus terjadi di Amerika Serikat, 857 kasus di Eropa, 195 kasus di Jepang, 140 kasus di China, dan sebanyak 67 kasus terjadi di Canada, India, dan negara lainnya. Penyebab terbesar terjadinya ledakan adalah debu bahan makanan (40%), debu kayu (17%), logam (10%), lainnya (10%), batu bara (9%), plastik/karet (7%), tidak diketahui (4%), dan material anorganik (3%).

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) menemukan setidaknya sebanyak 281 kasus *dust explosion* terjadi di industri-industri Amerika Serikat antara tahun 1980 dan 2005, yaitu rata-rata sekitar 10 insiden terjadi per tahun pada rentang waktu 25 tahun. Kasus tersebut dilaporkan menghasilkan korban meninggal sebanyak 119 jiwa dan 718 jiwa lainnya mengalami cedera parah. Debu kayu, produk makanan, dan logam masing-masing menjadi penyebab

lebih dari 20% kasus ledakan, dan 14% disebabkan oleh produk plastik (CSB, 2006).

Studi kasus terdahulu menunjukkan telah terjadi beberapa kasus *dust explosion* berskala besar yang mengakibatkan kerugian besar dan timbulnya korban jiwa di industri-industri di dunia. Pada tahun 2003, terjadi sebuah ledakan besar dan kebakaran terjadi di *West Pharmaceutical Services* yang terletak di Kingston, Carolina Utara dan *CTA Acoustics* yang terletak di Corbin, Kentucky. Ledakan tersebut menyebabkan lebih dari 5 kematian dan lebih dari 35 orang cedera. Insiden tersebut diketahui dipicu oleh debu *polyethylene* dan debu *phenolic resin*. Pada tahun 2004, terjadi sebuah ledakan di pabrik produksi plastik yang berada di United Kingdom dan industri kayu Amerika Serikat. Tahun 2008, *dust explosion* yang disebabkan oleh debu gula terjadi di *Imperial Sugar Company* yang terletak di Port Wentworth, Georgia. Pada tahun 2012 sebuah kebakaran dan ledakan terjadi di pabrik Tinta Amerika Serikat yang terletak di East Rutherford. Penyebab insiden tersebut diantaranya karbon hitam dan resin (CSB, 2015).

Berdasarkan data *dust explosion* di dunia sejak tahun 1785-2012, diketahui bahwa mayoritas kasus *dust explosion* yang terjadi hingga tahun 2007 dipicu oleh debu makanan dan debu kayu. Namun, dalam satu dekade terakhir kasus *dust explosion* besar justru kebanyakan terjadi di industri logam. Hampir setiap tahun di dunia terjadi kasus *dust explosion* yang berkaitan dengan debu logam (Yuan et al., 2015).

Selama ini, industri logam dianggap memiliki risiko sangat rendah untuk terjadi insiden *dust explosion*. Hal tersebut dikarenakan industri logam tidak

menggunakan material sangat mudah terbakar seperti gula atau tepung. Akan tetapi, banyak dari debu logam memiliki karakteristik tersendiri yang dapat menciptakan risiko ledakan sangat tinggi. Saat ini berbagai mesin berkecepatan tinggi digunakan selama proses produksi produk logam. Sebagai hasilnya adalah ukuran partikel-partikel sisa proses produksi semakin kecil. Semakin kecil ukuran partikel, maka kemungkinan terjadinya ledakan akan semakin besar. Berbeda dengan jenis debu lainnya, debu logam merupakan jenis debu yang memiliki risiko pembakaran tinggi. Pada umumnya, sumber pembakaran berasal dari panas atau percikan api. Namun begitu, meski tidak ada percikan api sebagai sumber ignisi, debu logam dapat secara spontan terbakar jika suhu debu atau permukaan mencapai suhu pembakaran minimal debu tersebut. Maka dari itu, risiko terjadinya ledakan dan kebakaran akan lebih besar pada industri yang menghasilkan debu logam karena debu tersebut dapat mengalami *self-ignition* (pembakaran dengan sendirinya) (Mayer et al., 2015). Nedved dan Imamkhasani (1991) menyebutkan bahwa *dust explosion* akibat bahan logam lebih dahsyat dibandingkan dengan *dust explosion* yang disebabkan oleh bahan lainnya.

Sejumlah kasus *metal dust explosion* yang telah terjadi menyebabkan banyaknya kematian dan kerusakan yang sangat besar. Pada tahun 2014, *dust explosion* terjadi di industri otomotif China, sebanyak 146 pekerja meninggal dan lebih dari 100 korban mengalami luka-luka. Ledakan dimulai di *dust collector* dan menyebar ke ruang produksi melalui kumpulan debu logam yang ada di dalam pipa, di atas pipa, dan permukaan lainnya. Tekanan yang diciptakan oleh ledakan pertama membuat debu terakumulasi di udara dan menciptakan ledakan sekunder.

Sebelumnya, di tahun 2011, *dust explosion* terjadi di industri penghasil bubuk besi dan baja, tepatnya di *Hoeganaes Corporation* di Gallatin, Tennessee. Kasus tersebut menyebabkan 5 orang meninggal dan 3 orang luka-luka. Material yang menjadi terjadinya insiden ini adalah debu besi yang digunakan dalam proses produksi (CSB, 2011).

Pada tahun 2010, *metal dust explosion* terjadi di *AL Solution, Inc* di New Cumberland, West Virginia. Insiden tersebut berakibat pada hancurnya bangunan pabrik dan dihentikannya proses produksi. Selain itu, insiden tersebut mengakibatkan 3 pekerja meninggal dan 1 orang cedera parah. Investigasi yang dilakukan oleh CSB, diketahui bahwa ledakan disebabkan oleh kelebihan tekanan yang memicu terjadinya *metal dust explosion*. Perusahaan *AL Solution, Inc* ini diketahui pernah mengalami kebakaran sebanyak 7 kali dan 2 kali ledakan hebat yang berkaitan dengan *metal dust explosion* dalam kurun waktu tahun 1993 hingga 2010 (CSB, 2014).

Tanggal 29 Oktober 2003, sebuah ledakan yang disebabkan oleh debu logam aluminium membunuh satu orang pekerja dan beberapa orang lainnya luka-luka di *Hayes Lemmerz International* di Hungtinton, Indiana. Insiden ini bermula dari *dust collector* yang tidak cukup terawat. Ledakan primer yang terjadi kemudian menyebabkan debu aluminium yang terakumulasi di kasau dan permukaan lainnya terangkat ke udara dan menimbulkan ledakan sekunder yang merusak properti serta menambah korban jiwa (CSB, 2006).

Sementara itu, di Indonesia data statistik mengenai kasus *dust explosion* masih sulit untuk didapatkan. Banyak kasus yang tidak dilaporkan atau tercatat. Selain itu, kemungkinan masih banyak kasus *dust explosion* yang tidak

teridentifikasi dikarenakan kurangnya pengetahuan tentang *dust explosion* (Wulandari dkk., 2014). Hal tersebut tidak mengurangi adanya potensi bahaya *dust explosion* pada perusahaan yang memproduksi, menggunakan, dan menghasilkan material *combustible dust*. Salah satunya adalah PT X.

PT X merupakan salah satu perusahaan logam terbesar di Indonesia yang memproduksi *billet* baja dan *wire rod*. Bahan baku berupa: *scrap* dan *sponge iron* dalam proses produksi di PT X ini berpotensi menyebabkan kebakaran dan ledakan. Material *sponge iron* tersebut memiliki suhu *self-ignition* antara 150-230⁰C yang dapat menyebabkan material ini dapat terbakar sendiri jika mencapai suhu tersebut. Selain itu, dalam proses produksi menggunakan bahan-bahan yang dapat menyebabkan *dust explosion* seperti: aluminium, silika mangan, medium karbon, dan ferro mangan. Proses peleburan *scrap* dari padat menjadi cair dalam proses produksi menghasilkan panas yang sangat tinggi yaitu sebesar 1500-1600⁰C, serta penggunaan bahan baku yang bersifat mudah menyala menyebabkan industri ini berpotensi besar untuk terjadinya *metal dust explosion*. Selain itu, adanya *dust collector* sebagai komponen pendukung proses produksi memungkinkan terdapatnya akumulasi debu logam di ruang terbatas yang apabila terjadi gesekan antar debu dapat menimbulkan panas. Debu yang dihasilkan selama proses produksi adalah debu logam yang mudah terbakar, seperti: sulfur, seng, kromium, dan barium (PT X, 2017).

PT X ini sendiri pernah beberapa kali mengalami ledakan yaitu pada tahun 2004 dan tahun 2017 yang membuat proses produksi berhenti sementara. Tahun 2004, ledakan terjadi di *Electric Arc Furnace* dan belum diketahui penyebabnya.

Pada tahun 2017, ledakan terjadi pada bagian *Ladle Refining Furnace* dimana cairan baja tumpah dari *ladle* dan bereaksi dengan air di permukaan lantai. Kedua kasus ledakan tersebut terjadi di departemen *Steel Melting Shop* dimana terdapat akumulasi debu terbanyak dari seluruh departemen produksi. Hal tersebut diketahui dari hasil pengukuran emisi debu tiap departemen, dimana departemen *Steel Melting Shop* memiliki kadar debu sebesar $3,9 \text{ mg/Nm}^3$, sedangkan departemen lainnya hanya sebesar $2,0 \text{ mg/Nm}^3$ (PT X, 2017).

Adanya potensi bahaya *dust explosion* di PT X dapat dikurangi dengan melakukan tindakan pencegahan dan pengendalian, salah satunya dengan melakukan analisis bahaya. *Fault Tree Analysis* merupakan teknik atau metode yang digunakan untuk menganalisis reliabilitas dari suatu sistem dengan menggambarkan komponen kegagalan ke dalam suatu diagram visual atau model logika (Sharma & Singh, 2015). Metode ini efektif dalam menemukan inti permasalahan karena dapat memastikan suatu kejadian yang tidak diinginkan terjadi karena suatu titik kegagalan. Dibandingkan dengan metode lain, penggunaan FTA dalam analisis bahaya *dust explosion* lebih tepat digunakan karena dapat menampilkan seluruh kejadian atau kombinasi kejadian yang dapat menyebabkan insiden, serta mengetahui besarnya kontribusi kejadian tersebut pada *top event*, sehingga tindakan pencegahan dan pengendalian dapat dilakukan mulai dari penyebab dasar terjadinya *dust explosion* (Eckhoff, 2003).

Berdasarkan pemaparan di atas, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian mengenai “Analisis Potensi Bahaya *Metal Dust Explosion* di PT X (dengan Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis*)”.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah “Bagaimana analisis potensi bahaya *metal dust explosion* di PT X menggunakan metode *fault tree analysis*?”

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya *metal dust explosion* di PT X menggunakan metode *fault tree analysis*.

1.4 MANFAAT HASIL PENELITIAN

1.4.1 Bagi Pihak Perusahaan

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan untuk pihak perusahaan terkait penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja khususnya pada aspek pengendalian bahaya *dust explosion*.

1.4.2 Bagi Institusi Pendidikan

Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai tambahan pustaka bagi institusi pendidikan tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) terutama terkait pengendalian *dust explosion*.

1.4.3 Bagi Peneliti

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk menambah pengetahuan dan pengalaman di bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) terutama mengenai upaya pencegahan dan pengendalian bahaya *dust explosion*.

1.5 KEASLIAN PENELITIAN

Tabel 1.1 Penelitian-penelitian yang Relevan dengan Penelitian Ini

No	Judul Penelitian	Nama Peneliti	Tahun dan Tempat Penelitian	Jenis/Desain Penelitian	Variabel/Fokus Penelitian	Hasil Penelitian
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1.	Analisis <i>Coal Dust Explosion Accident</i> di PLTU X Tahun 2011	Bobby Robson Sitorus	2011, PLTU X	Kualitatif deskriptif	Bahaya <i>coal dust explosion</i> , Penyebab <i>coal dust explosion accident</i>	Penyebab langsung adalah interaksi bahan, alat dan proses sehingga terpenuhi-nya 5 kriteria <i>dust explosion pentagon</i> dan menciptakan ledakan. Penyebab tidak langsung terdiri dari perilaku tidak aman dan kondisi tidak aman. Perilaku tidak aman yang dilakukan adalah mengopera-sikan <i>mill</i> saat terjadi gangguan <i>blocking</i> , membuka <i>dampers cold air</i> terlalu cepat sehingga menciptakan. Terpenuhinya 5 kriteria <i>coal dust explosion</i> diakibatkan oleh pengetahuan akan risiko <i>coal dust explosion</i> , tidak tersedianya SOP, pengaturan mode operasi yang belum sesuai, dan kerusakan <i>dampers cold air</i> . Sedangkan kondisi tidak aman terdiri dari gangguan <i>blocking</i> , kerusakan peralatan, dan desain <i>coal feeder</i> . Penyebab dasar adalah komunikasi yang sulit antara operator dan kontraktor EPC, ketidakjelasan mengenai tanggung jawab perbaikan, kurangnya pengalaman personel, dan tidak ada pengawasan mengenai K3 operasi.
2.	<i>Risk Analysis and A Study of Risk Awareness and Risk Communication at LEAF Gavle Concerning Dust Explosion</i>	Tobias Dahl Hansson	2005, Leaf Gavle	Kualitatif deskriptif	<i>Dust explosion, risk analysis, risk awareness, risk communication</i>	Hasil analisis didapatkan bahwa risiko <i>dust explosion</i> bukan merupakan insiden yang sangat berisiko tinggi, akan tetapi masih merupakan insiden berisiko tinggi yang memerlukan tindakan pencegahan. Tingkat kepedulian dan pengetahu-an pekerja mengenai <i>dust explosion</i> sangatlah rendah, Model komunikasi yang tepat dilakukan terkait dengan <i>dust explosion</i> adalah komunikasi antara manajemen dan pekerja.
3.	<i>Risk Analysis of Dust Explosion Scenarios Using Bayesian Networks</i>	Zhi Yuan, Nima Khakzad, Faisal Khan, Paul Amyotte	2015, Perusaha-an X	Kualitatif deskriptif	<i>Dust explosion, Bayesian Networks risk analysis</i>	Penyebab dasar <i>dust explosion</i> adalah partikel dari bahan produksi, konsentrasi oksigen, dan <i>safety training</i> .

Beberapa hal yang membedakan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian mengenai analisis potensi bahaya *metal dust explosion* dengan menggunakan metode *fault tree analysis* belum pernah dilakukan sebelumnya.

2. Fokus penelitian dalam penelitian Bobby Robson Sitorus adalah potensi bahaya *coal dust explosion*, dalam penelitian Zhi Yuan, et al dan Tobias Hansson berfokus pada bahaya *dust explosion*, sedangkan dalam penelitian ini fokus penelitian adalah potensi bahaya *metal dust explosion*.
3. Jenis rancangan penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D), sedangkan penelitian sebelumnya adalah kualitatif deskriptif.

1.6 RUANG LINGKUP PENELITIAN

1.6.1 Ruang Lingkup Tempat

Penelitian ini dilakukan di perusahaan logam PT X.

1.6.2 Ruang Lingkup Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada Desember 2016 – Januari 2019.

1.6.3 Ruang Lingkup Keilmuan

Penelitian ini membahas mengenai analisis potensi bahaya *metal dust explosion*, sehingga ruang lingkup materi dalam penelitian ini adalah bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dengan membatasi pada bahaya *metal dust explosion* dengan metode *Fault Tree Analysis*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 LANDASAN TEORI

2.1.1 *Dust Explosion*

2.1.1.1 Definisi

Dust explosion merupakan sekumpulan awan debu yang terbakar (Eckhoff, 2003). Menurut Nedved dan Imamkhasani (1991), *dust explosion* atau ledakan debu adalah pembakaran yang cepat dari partikel debu yang berterbangan di udara. Suhu tinggi yang terjadi pada pembakaran tersebut kemudian menyebabkan gas yang mengelilinginya berkembang dengan sangat cepat, yang seterusnya membuat suatu peningkatan tekanan pada dinding bejana yang memuat awan debu.

Dust explosion disebabkan oleh bahan bakar berupa debu dari material organik, anorganik, maupun logam, seperti: debu aluminium, besi, magnesium, dan mangan. Insiden *dust explosion* yang disebabkan oleh debu logam mudah terbakar biasa dikenal sebagai *metal dust explosion*. Menurut NFPA 484, debu logam mudah terbakar tersebut adalah potongan logam halus yang memiliki diameter 420 μm atau lebih kecil, yang memiliki potensi untuk menghasilkan kebakaran atau ledakan.

2.1.1.2 Parameter *Dust Explosion*

Kemampuan elemen *dust explosion pentagon* untuk dapat menyebabkan *dust explosion* dapat dilihat dari beberapa parameter berikut:

1. *Minimum Ignition Energy* (MIE)

Energi ignisi minimal adalah pengukuran sensitifitas campuran debu dan udara terhadap pelepasan listrik atau elektrostatik. Debu yang memiliki MIE kurang dari 25 mJ diketahui mudah terignisi oleh listrik statis.

2. *Minimum Ignition Temperature* (MIT)

Suhu ignisi minimal mengindikasikan suhu atas permukaan yang memungkinkan awan debu untuk menyala. MIT dapat digunakan untuk menilai bahaya permukaan panas pada mesin listrik dan mekanik.

3. *Auto-ignition Temperature* (AIT)

Suhu *auto-ignition* merupakan suhu lapisan debu yang terpapar saat reaksi eksotermis sedang berlangsung dan sangat mampu untuk menyebabkan debu menyala.

4. *Limiting Oxygen Concentration* (LOC)

Batas konsentrasi oksigen adalah konsentrasi maksimum oksigen supaya tidak menyebabkan pembakaran atau ledakan.

5. *Lower Explosion Limit* (LEL)

Batas ledakan terendah adalah konsentrasi minimal debu atau bubuk di udara yang diperlukan untuk menyebarkan ledakan. LEL debu mudah terbakar untuk *dust explosion* dalah 5 sampai 500 g/m³, tergantung dari tipe debu.

6. *Upper Explosion Limit* (UEL)

Batas ledakan tertinggi adalah konsentrasi maksimal debu atau bubuk di udara agar ledakan tidak menyebar.

7. *Dust Explosion Constant* (K_{st})

Dust explosion constant adalah parameter standar untuk tingkat kenaikan tekanan maksimal dalam ruang terbatas dalam kondisi tertentu. K_{st} adalah

indikator tingkat keparahan ledakan dan waktu yang tersedia untuk melakukan tindakan sebelum terjadinya ledakan.

Tabel 2.1 Sistem Klasifikasi Debu German

Klas <i>Dust Explosion</i>	K_{st} (bar.m/s)	Keparahan Ledakan	Contoh
St 0	0	Tidak ada ledakan	Semen atau pasir
St 1	>0 – 200	Lemah ke sedang	Debu bulir padi dan gula
St 2	>200 – 300	Kuat	Pigmen organik
St 3	>300	Sangat kuat	Debu logam

Sumber: AGP Mendes (1999)

8. *Maximum Explosion Pressure* (P_{max})

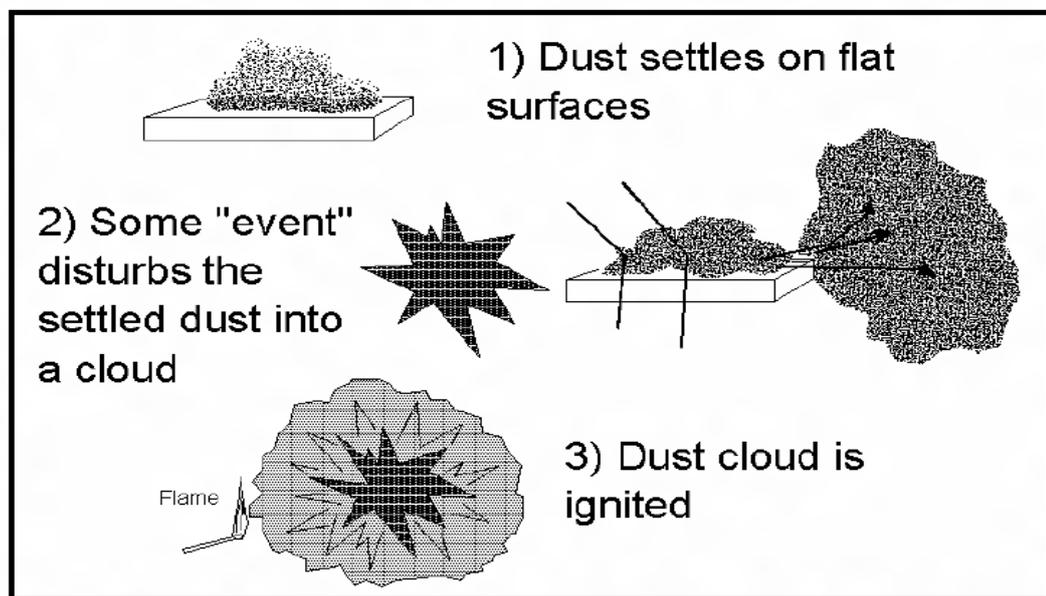
Tekanan ledakan maksimal adalah indikator tekanan yang dapat diterima oleh suatu ruang terbatas saat terjadinya ledakan.

2.1.1.3 *Dust Explosion* Primer dan Sekunder

Dust explosion primer terjadi ketika debu yang terdapat dalam wadah, ruangan, atau peralatan terbakar dan meledak (CSB, 2006). Ledakan primer adalah ledakan awal yang terjadi langsung dari sumber ignisi. Biasanya ledakan ini terjadi di area tertutup atau di dalam alat produksi. Apabila terjadi peningkatan suhu atau tekanan saat terjadinya pembakaran, maka dapat menyebabkan rusaknya ruang tertutup. Hal tersebut menyebabkan adanya gelombang tekanan besar yang menyebabkan struktur permukaan bergetar, sehingga mengangkat debu lain yang berada di tempat kerja dan membentuk kumpulan awan debu (Mendes, 1999). Awan debu tersebut memiliki kemampuan untuk memindahkan api yang sedang menjalar yang dapat memicu ledakan di tempat lain. Ledakan itulah yang disebut sebagai ledakan sekunder.

Ledakan sekunder terjadi ketika kumpulan debu yang berada di lantai atau permukaan lainnya terangkat dan terbakar akibat ledakan pertama. *Dust explosion*

sekunder merupakan sebuah malapateka yang paling buruk karena menyebabkan kerusakan besar. *Dust explosion* sekunder lebih destruktif dibandingkan *dust explosion* primer karena adanya kenaikan kuantitas dan konsentrasi dari *combustible dust* yang terdispersi dan lebih besarnya sumber nyala api. Selain itu, tekanan yang begitu besar dari ledakan sekunder ini dapat menghancurkan tembok bangunan (CSB, 2006).



Gambar 2.1 *Dust Explosion Sekunder*

Sumber: U.S. Chemical Safety and Hazard Identification Board (2006)

2.1.1.4 *Dust Explosion Pentagon*

Terdapat lima elemen yang dibutuhkan untuk memicu terjadinya *dust explosion* yang biasa disebut sebagai "*Dust Explosion Pentagon*". Elemen tersebut terdiri dari tiga elemen yang dibutuhkan untuk menyebabkan kebakaran, yaitu (CSB, 2006):

1. Bahan bakar (*combustible dust*);
2. Sumber ignisi (panas); dan

3. Oksigen di udara (oksidan).

Dua elemen tambahan yang harus ada untuk menyebabkan *dust explosion* adalah:

4. Suspensi partikel debu dalam jumlah dan konsentrasi yang cukup untuk memicu ledakan; dan
5. Ruang terbatas.

Apabila salah satu dari lima elemen di atas tidak terpenuhi, maka *dust explosion* tidak dapat terjadi (OSHA, 2009).

2.1.1.4.1 *Combustible Dust*

Combustible dust atau debu mudah terbakar merupakan partikel atau potongan dari material padat yang dalam berbagai bentuk, ukuran, atau komposisi kimia dapat menghasilkan kebakaran atau bahaya deflagrasi ketika tersuspensi di udara atau media oksidasi lainnya dalam konsentrasi tertentu (OSHA, 2009).

Sedangkan, dalam NFPA 654 dijelaskan bahwa *combustible dust* adalah partikulat padat mudah terbakar yang dapat menghasilkan *flash fire* (kebakaran yang menyebar dengan cepat melalui bahan bakar tanpa menghasilkan tekanan yang bersifat merusak) atau bahaya ledakan saat tersuspensi di udara atau media oksidasi dari proses khusus dalam konsentrasi tertentu.

Debu mudah terbakar diperlukan untuk menyebabkan *dust explosion*. Komponen kimia dari debu tersebut akan menentukan tingkat oksigen yang diperlukan untuk memicu ledakan, serta menentukan tingkat keparahan ledakan. Semakin kering debu, maka kerusakan yang diakibatkan oleh ledakan akan semakin besar. Debu dengan kelembaban lebih dari 30% tidak akan memicu

terjadinya *dust explosion* karena partikel debu teraglomerasi dan mengurangi area permukaan untuk pembakaran. Secara umum, partikel debu yang berukuran lebih kecil dari 500 μm dapat menyebabkan *dust explosion* dan semakin kecil ukuran partikel, maka semakin besar pula kerusakan yang akan ditimbulkan ledakan (Mendes, 1999).

Combustible dust biasanya berupa debu organik atau debu logam dalam bentuk partikel-partikel kecil, kepingan, atau campuran dari beberapa bentuk tersebut (OSHA, 2009). Beberapa material yang dapat membentuk debu mudah terbakar, diantaranya (Eckhoff, 2003):

1. Material organik alami (gula, linen, padi, dll);
2. Material organik sintetis (plastik, pestisida, dll);
3. Batu bara; dan
4. Logam (aluminium, magnesium, seng, besi, dll).

Setiap jenis debu memiliki karakteristik sendiri untuk dapat menyebabkan *dust explosion*. Tidak seperti material organik (seperti: gula dan tepung) yang sangat mudah terbakar, material logam dianggap tidak begitu berperan untuk menyebabkan *dust explosion*. Namun begitu, debu logam memiliki karakteristik unik dibandingkan dengan jenis debu lainnya, sehingga berisiko tinggi menyebabkan deflagrasi dan ledakan. Beberapa karakteristik debu logam yaitu (Mayer et al., 2015):

1. Risiko tinggi penyalan api (ignisi)

Mesin produksi yang digunakan dalam pengerjaan logam, seperti: alat pemotong atau pemecah logam, secara terus menerus menghasilkan panas dan loncatan bunga api yang dapat menyebabkan timbulnya nyala api. Selain itu, debu

dapat terignisi secara spontan apabila suhu debu atau permukaan mencapai suhu minimum untuk menyebabkan ignisi. Debu logam memungkinkan untuk terjadi kebakaran dan ledakan lebih tinggi dibanding jenis debu lain. Hal tersebut dikarenakan setiap proses produksi yang berkaitan dengan logam mampu menghasilkan suatu kondisi dimana debu logam melakukan *self-ignition*.

2. Muatan energi tinggi

Logam dan debu logam memiliki muatan energi lebih tinggi dibandingkan dengan jenis material lainnya. Muatan energi tersebut yang menyebabkan logam memiliki waktu terbakar yang sangat lama dan suhu terbakar yang lebih tinggi. Berbeda dari material organik yang memiliki suhu terbakar sekitar 3000°F hingga 4000°F setelah terjadinya ledakan, logam memiliki suhu terbakar lebih dari 5000°F.

Penggunaan media pemadam kebakaran biasa seperti air dan sodium bikarbonat tidak dapat digunakan untuk kebakaran debu logam karena dapat mengakibatkan reaksi kimia dengan logam yang justru dapat menyebabkan pembakaran. Hanya media pemadam kebakaran klas D yang dapat digunakan ketika terjadi kebakaran debu logam, meski begitu, media pembakaran ini tidak dapat sepenuhnya menghilangkan api karena terlalu tingginya panas kebakaran akibat debu logam.

3. Bara api

Proses penanganan dan pengerindaan logam dapat menghasilkan partikel debu halus. Debu halus inilah yang dapat dengan mudah berubah menjadi bara api apabila terjadi reaksi antara panas dan oksigen yang bereaksi secara langsung terhadap permukaan partikel debu. Bara api tersebut juga sangat mudah untuk mengalami *self-ignition*.

2.1.1.4.2 Sumber Ignisi

Sumber ignisi adalah sumber panas yang dapat menjadi cukup panas untuk menyebabkan penyalaan api material. Beberapa sumber ignisi *dust explosion* diantaranya sebagai berikut:

1. Pengelasan dan pemotongan

Penyebab *dust explosion* yang sering terjadi kebanyakan berkaitan dengan panas yang dihasilkan oleh api kecil, peralatan las, atau pemotong, dimana ketiganya mampu menghasilkan energi lebih besar dari yang dibutuhkan untuk dapat memicu nyala api debu di udara atau debu yang menumpuk di permukaan (Mendes, 1999).

2. Panas spontan

Panas spontan dapat terjadi jika material disimpan di dalam suatu wadah besar, lapisan debu dibiarkan selama jangka waktu panjang, atau terdapat reaksi eksotermis yang menghasilkan panas lebih cepat dibandingkan kemampuan api keluar dari ruang terbatas. Adanya suatu reaksi, panas, dan suhu, dapat menimbulkan situasi pelepasan yang menyebabkan material terignisi seketika tingkat suhu mencapai tingkat *auto-ignition*. Selanjutnya lapisan debu di sekitarnya dapat memicu terjadinya *dust explosion* (Mendes, 1999).

3. Permukaan panas

Permukaan panas dapat menjadi sumber ignisi untuk lapisan debu yang cenderung menyebabkan terjadinya kebakaran daripada ledakan. Namun, apabila lapisan tersebut terganggu dan tercampur di udara, konsentrasi debu dapat melebihi batas ledakan terendah dan menyebabkan ledakan. Semakin tebal lapisan

debu dan semakin tinggi suhu ambien, maka suhu ignisi minimal akan semakin rendah. Debu yang tercampur di udara dalam konsentrasi melebihi batas ledakan terendah (LEL) juga dapat menyebabkan terjadinya nyala api jika kontak langsung dengan permukaan panas. Permukaan panas dapat ditemukan dalam pipa-pipa selama proses produksi, termasuk *dryer*, *boiler* dan *oven*, peralatan pemanas ruangan, mesin listrik dan mekanik, serta lampu (Mendes, 1999).

2.1.1.4.3 Oksidan

Oksigen dalam jumlah yang cukup untuk dapat menyebabkan *dust explosion* berfungsi untuk menjadi media pembakaran dan mampu mempengaruhi tingkat ledakan. Situasi yang lebih berbahaya juga dapat terjadi jika gas mudah terbakar bercampur dengan debu atau yang biasa disebut campuran *hybrid* (Mendes, 1999).

2.1.1.4.4 Suspensi Partikel Debu

Dust explosion dapat terjadi jika debu tersuspensi di udara (Mendes, 1999). Biasanya debu dapat tersebar di udara dalam peralatan proses produksi. Apabila terjadi di dalam sebuah gedung, maka hal itu terjadi dikarenakan adanya kebocoran atau tumpahan yang besar, *dust explosion* awal berskala kecil, atau gangguan yang mengguncang lapisan debu dari peralatan atau mengangkat debu dari lantai (Beacon, 2008).

2.1.1.4.5 Ruang Terbatas

Semakin terbatas debu maka ledakan akan semakin besar. Pemanasan yang cepat dapat menghasilkan kenaikan tekanan yang dapat keluar jika terjadi kerusakan besar pada peralatan. Peralatan yang mudah menyebabkan ledakan

diantaranya adalah elevator, gerobak, silo penyimpanan, penyimpan bubuk, *dust collector*, *blender* dan *mixer* (Mendes, 1999). Selain itu, ruang terbatas dapat diciptakan oleh dinding, plafon, lantai, dan atap sebuah gedung.

2.1.1.5 Pencegahan dan Pengendalian *Dust Explosion*

Tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya *dust explosion* atau mengurangi dampak yang dihasilkan apabila *dust explosion* terjadi, menurut Eckhoff (2003) adalah sebagai berikut:

2.1.1.5.1 Pencegahan terhadap awan debu mudah meledak

Tindakan yang dapat dilakukan guna mengurangi kemampuan awan debu untuk meledak diantaranya adalah:

1. Penerapan proses kerja aman untuk mencegah atau membatasi keberlanjutan awan debu mudah meledak

Salah satu cara untuk mencegah *dust explosion* adalah merancang suatu proses dan fasilitas kerja yang melakukan penanganan partikel padat mudah terbakar secara tepat. Penerapan rancangan harus meliputi segala properti fisik maupun material berbahaya. Bangunan pabrik dan seluruh proses kerja harus melalui studi analisis bahaya, dimana studi tersebut mencakup perlengkapan, prosedur proses kerja, pelatihan pekerja, dan pelaksanaan tindakan perlindungan lainnya. Sistem proses kerja dirancang untuk membatasi emisi debu seminimal mungkin. Segala perubahan, penambahan, atau modifikasi proses kerja harus melalui evaluasi *management of change* (MOC). Bangunan pabrik harus dirancang untuk tahan terhadap api dan menghasilkan sedikit kerusakan apabila terjadi ledakan (Beattie, 2013).

Menciptakan proses kerja merupakan alternatif tindakan pencegahan *dust explosion* yang biasanya membutuhkan biaya besar. Tindakan pencegahan ini dilakukan guna meniadakan risiko bahaya ledakan selama proses kerja. Guna mencegah dan mengendalikan *dust explosion*, keberadaan awan debu dalam proses produksi, perawatan, transportasi, dan penyimpanan harus tetap berada dalam jumlah minimal (Eckhoff, 2009).

2. *Inerting*

Inerting adalah tindakan pencegahan dengan mengganti oksigen yang ada selama proses produksi dengan gas inert untuk mencegah terjadinya ignisi (Mayer et al., 2015). *Inerting* berfungsi untuk mengurangi konsentrasi oksigen di dalam peralatan kerja hingga mencapai tingkat yang tidak melebihi batas konsentrasi oksigen untuk meledak. Saat konsentrasi oksigen lebih rendah dari LOC, maka reaksi oksidasi tidak dapat menghasilkan cukup tenaga untuk menyebabkan ledakan. Material yang biasa digunakan untuk pembersihan inert adalah nitrogen, karbondioksida, atau gas asap.

Kerugian dari penerapan teknik inert ini adalah ruang produksi harus tertutup atau semi tertutup untuk mencegah keluarnya gas inert dari ruangan. Teknik pencegahan ini sebenarnya adalah teknik pencegahan termahal, namun apabila melihat dari seringnya terjadi ignisi, maka pencegahan ini sangat ekonomis untuk pencegahan *dust explosion* dalam jangka panjang (Mendes, 1999).

2.1.1.5.2 *Pencegahan terhadap sumber ignisi*

Pencegahan sumber ignisi tidaklah mudah untuk diterapkan dan memerlukan biaya besar, selain itu pencegahan ini tidak dapat dilakukan

sepenuhnya karena adanya faktor manusia yang tidak terduga. Beberapa tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah adanya sumber ignisi, diantaranya:

1. Pencegahan terhadap kemungkinan terjadinya *self-heating*

Beberapa tindakan untuk mencegah terjadinya *self-heating* adalah (Eckhoff, 2003):

- 1) Pengaturan suhu dan kelembaban dari bahan berupa bubuk atau debu sebelum ditambahkan ke dalam mesin produksi atau alat penyimpanan bahan;
- 2) Pengaturan bahan bubuk atau debu agar mencapai tingkatan yang dapat diterima;
- 3) Monitoring suhu campuran bahan bubuk secara berkelanjutan;
- 4) Monitoring kemungkinan dekomposisi gas atau produk oksidasi sebagai upaya pencegahan awal dari *self-heating*; dan
- 5) Memindahkan material dari satu silo ke lainnya ketika terdeteksi adanya kemungkinan *self-heating*.

2. Pencegahan terhadap api terbuka

Pencegahan sumber ignisi oleh api terbuka adalah dengan menerapkan prosedur organisasi, seperti penerapan peraturan larangan merokok dan penggunaan korek api di lingkungan kerja, serta penerapan peraturan yang ketat mengenai sistem kerja panas (Eckhoff, 2003).

3. Pencegahan terhadap permukaan panas

Permukaan panas sering kali ditemukan di dalam proses kerja baik itu disengaja maupun tidak disengaja. Beberapa tindakan ini dapat dilakukan untuk mencegah adanya sumber ignisi akibat permukaan panas, yaitu (Eckhoff, 2003):

- 1) Hilangkan seluruh debu mudah terbakar sebelum melakukan kerja panas;

- 2) Hilangkan akumulasi debu di permukaan panas;
- 3) Isolasi tempat yang memiliki permukaan panas;
- 4) Penggunaan peralatan yang memiliki risiko terkecil terjadinya panas berlebih;
dan
- 5) Inspeksi dan prosedur perawatan yang dapat meminimalisasi risiko panas berlebih.

4. Program manajemen dan pelatihan

1) Pekerja

Pekerja merupakan baris pertama dari pencegahan dan pengendalian *dust explosion*. Apabila orang yang paling dekat dengan sumber bahaya mendapatkan pelatihan untuk mengenali dan mencegah bahaya debu mudah terbakar di tempat kerja, maka mereka dapat mengenali situasi tidak aman, mengambil tindakan pencegahan, dan melaporkan pada pihak manajemen. Setiap pekerja harus mendapatkan pelatihan tentang pelaksanaan kerja aman. Selain itu, pihak manajemen harus memastikan bahwa pekerja harus mendapatkan pelatihan bahaya tempat kerja sebelum mereka mulai bekerja (NCDOL, 2012).

2) Pihak manajemen

Pihak manajemen yang kompeten bertanggung jawab untuk melaksanakan analisis tempat kerja guna mengembangkan tindakan pencegahan dan pengendalian yang berkaitan dengan proses produksi serta memastikan tindakan pencegahan dan pengendalian *dust explosion* terlaksana dengan benar. Beberapa tindakan pencegahan yang dapat dilakukan oleh pihak manajemen diantaranya (Beattie, 2013):

1. Memastikan terlaksananya proses kerja, prosedur pemeliharaan, dan tindakan gawat darurat;
2. Pembuatan peraturan dan laporan tahunan; dan
3. Mengadakan pelatihan untuk semua pekerja di bagian produksi, pemeliharaan, dan *supervisor* untuk menangani partikel padat mudah terbakar.

Sedangkan, pelatihan yang tepat bagi pihak manajemen itu sendiri adalah pelatihan untuk mengajak pekerja melaporkan adanya proses kerja tidak aman dan bagaimana membuat tindakan pengurangan bahaya sebisa mungkin (NCDOL, 2012).

5. Program inspeksi

Inspeksi perlu dilaksanakan untuk memastikan kondisi kerja yang aman. Program ini harus dilaksanakan secara rutin dan tertulis yang nantinya akan diperiksa oleh pihak manajemen, sehingga apabila terdapat kekurangan dalam program dapat segera dilakukan tindakan. Inspeksi ini harus mencakup *housekeeping* dan proses kerja yang aman. Inspeksi perlengkapan pencegahan dan perlindungan terhadap kebakaran dan ledakan harus diterapkan sesuai standar yang berlaku. Selain itu, inspeksi juga harus dilakukan pada peralatan kontrol debu, sumber ignisi yang berpotensi menyebabkan *dust explosion*, dan sistem kelistrikan. Hasil dari inspeksi, pemeliharaan, dan perbaikan harus didokumentasikan (Beattie, 2013).

2.1.1.5.3 Pengendalian

Tindakan pencegahan sangatlah penting untuk dilakukan, namun begitu tidak ada jaminan bahwa *dust explosion* tidak akan terjadi. Perusahaan harus selalu memikirkan kemungkinan adanya kelima elemen *dust explosion pentagon*

di dalam proses produksi. Oleh karena itu, tindakan pengendalian perlu dilakukan guna mengendalikan akibat yang ditimbulkan *dust explosion*. Tindakan pengendalian dilakukan guna mengurangi efek yang dihasilkan oleh ledakan.

Beberapa cara yang dapat dilakukan adalah:

1. Isolasi ledakan

Tujuan dari isolasi ledakan adalah untuk mencegah *dust explosion* menyebar dari tempat terjadinya ledakan primer ke unit proses kerja lainnya (Eckhoff, 2009). Ruang terbatas yang tidak tersambung dengan jalur ledakan harus dikendalikan dengan pembuatan peralatan yang berguna untuk mengisolasi ledakan, sehingga api tidak akan menjalar dari satu tempat ke tempat lainnya (Mayer et al., 2015).

2. *Dust collector*

Dust collector adalah suatu sistem untuk memperbaiki kualitas udara yang dihasilkan oleh industri dan proses produksi dengan cara mengumpulkan debu dan kotoran lainnya di udara. Udara yang ada di sekitar lubang isap akan masuk ke dalam lubang yang kemudian debu di dalam udara tersebut akan disaring menggunakan *filter*. *Dust collector* terdiri dari beberapa komponen, yaitu: *blower* (kipas), *dust filter* (saringan debu), *filter-cleaning system* (sistem pembersih saringan), dan *hopper* (wadah pengumpul debu). Pemasangan *dust collector* ini harus berada di luar ruangan karena dapat menyebabkan debu terkumpul di dalam pipa dan menyebabkan bahaya akumulasi debu (Mayer et al., 2015).

3. Pembuatan jalur ledakan

Tindakan pengendalian ini merupakan sistem yang paling umum digunakan dimana pintu jebakan diletakkan di posisi yang tepat sehingga ketika mengantisipasi adanya tekanan, katup pada jalur akan terbuka. Dengan cara ini

produk pembakaran hasil ledakan dapat keluar dengan cepat melalui jalur ledakan, sehingga tekanan ledakan akan berkurang. Dengan adanya desain yang kuat menahan, ledakan tidak akan menyebabkan kerusakan pada peralatan (Mendes, 1999).

Ruang terbatas seharusnya dilengkapi dengan jalur ledakan yang tepat apabila diletakkan di luar ruangan atau dekat dengan dinding luar ruangan. Jalur ledakan tersebut didesain untuk terbakar selama ledakan, sehingga tekanan dan api selama ledakan dapat keluar melalui jalur tersebut dan mencegah rusaknya ruang terbatas (Mayer et al., 2015).

4. Penekan otomatis

Penekan ledakan digunakan berdasarkan asumsi bahwa ledakan hampir sama dengan tipe deflagrasi, dan sebab itulah terdapat waktu yang diperlukan sebelum ledakan terjadi. Prinsip teknik ini dimulai dari terdeteksinya tahap awal ledakan yang kemudian menginisiasi pelepasan substansi pemadam kebakaran, seperti cairan, kabut, atau bubuk *non-explosive*, sehingga ledakan dapat dicegah untuk menjadi lebih besar. Jenis penekan yang paling umum digunakan adalah halon (*halogenated hydrocarbons*), seperti: klorobrometana (halon 1011), amonium fosfat (tropolar), atau bubuk sodium bikarbonat, dan air yang biasa digunakan dalam situasi tertentu (Mendes, 1999).

Sistem pemadam api otomatis harus dipasang di ruang terbatas untuk mencegah deflagrasi yang tidak terkendali. Pemasangan detektor ultraviolet dan infra merah, serta pengatur tekanan, adalah sebagai tindakan awal untuk

mengetahui adanya ignisi awan debu sehingga pemadam dapat bereaksi seketika ada api (Beattie, 2013).

5. *Housekeeping*

Housekeeping yang baik dapat membantu mengurangi risiko adanya debu di udara yang melebihi konsentrasi minimal untuk meledak dan mengurangi jumlah debu yang dapat menjadi bahan bakar terjadinya *dust explosion*. Pemeliharaan fasilitas dengan melakukan *housekeeping* yang baik sangatlah penting dan menjadi bagian dari kegiatan sehari-hari terutama pada bagian produksi dimana debu biasa dihasilkan. *Housekeeping* yang baik mampu mengendalikan akumulasi debu selalu dalam batas tidak meledak. Evaluasi tambahan dilaksanakan pada area kerja yang memiliki potensi bahaya *dust fire* dan *dust explosion*.

Berdasarkan NFPA 654, bagian yang harus rutin dibersihkan untuk mencegah adanya tumpukan debu adalah dinding, lantai, permukaan horizontal seperti: alat produksi, pipa, saluran, tiang, bagian atas dari langit-langit dan permukaan tersembunyi lainnya (Beattie, 2013). *Housekeeping* juga dapat dilakukan dengan menghilangkan lapisan debu menggunakan sistem penyedot debu tahan terhadap ledakan karena kumpulan debu yang terdapat di dalam penyedot debu dapat menciptakan atmosfer pembakaran lainnya. Selain itu, sebisa mungkin tidak menggunakan kipas angin untuk membuang lapisan debu dari permukaan karena hal ini juga dapat menciptakan atmosfer pembakaran.

6. Menghindari kemungkinan terjadinya *human error*

Human error memiliki pengaruh yang besar terhadap kejadian *dust explosion*, maka dari itu perusahaan sebisa mungkin menghindari adanya

kemungkinan terjadinya *human error*. Pengaruh *human error* terhadap kejadian *dust explosion* adalah sebagai berikut (Gong Li & Baozhi Chen, 2006):

1) Pembuat kebijakan

Pembuat kebijakan bertanggung jawab untuk membuat kebijakan dan menetapkan tujuan pencegahan dan pengendalian *dust explosion*, serta memastikan tujuan tersebut terpenuhi dengan menyediakan sumber daya manusia, dukungan finansial, teknik dan keperluan pendukung yang dibutuhkan. Kesalahan pembuat kebijakan terkait *dust explosion* biasa terjadi diakibatkan oleh kurangnya pengetahuan mengenai *dust explosion* yang dapat menyebabkan akibat fatal pada kerja aman perusahaan. Pembuat kebijakan tertinggi memiliki tanggung jawab besar dalam proses produksi dan kesehatan kerja di perusahaan. Ini adalah metode paling efektif untuk mencegah *human error*.

2) *Plant designer*

Plant designer memiliki tanggung jawab paling besar terhadap tindakan pencegahan dan pengendalian *dust explosion*. Sejak awal perancangan, perancang harus mempertimbangkan cara untuk mencegah terjadinya *dust explosion* dan bagaimana untuk mengurangi risiko bahaya. Apabila perancang mampu membuat lima elemen dari *dust explosion pentagon* tidak ada selama proses kerja, maka keadaan aman dapat tercapai. Tindakan ini merupakan metode terbaik untuk mencegah *dust explosion*.

3) Pekerja di bagian produksi (termasuk bagian perbaikan)

Pada area kerja yang memiliki potensi bahaya *dust explosion*, *human error* yang dilakukan pekerja bagian produksi dapat menyebabkan *dust explosion* secara langsung. Tidak sedikit kasus *dust explosion* yang terjadi di dunia disebabkan oleh

kesalahan pekerja produksi. *Human error* yang biasa dilakukan pekerja sehingga dapat menyebabkan *dust explosion* dibagi menjadi 3 bentuk yaitu:

1. Mempengaruhi debu berterbangan atau penumpukan debu

Kesalahan yang sering dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Melakukan cara kerja yang tidak pantas;
- 2) Membersihkan debu menggunakan alat penyedot debu yang tidak disarankan;
- 3) Memperbaiki alat produksi tidak tepat waktu atau hasil perbaikan yang tidak sempurna sehingga alat produksi tidak tertutup rapat dan menyebabkan debu keluar dari alat produksi;
- 4) Membersihkan di waktu yang tidak tepat atau membersihkan secara tidak sempurna yang menyebabkan adanya tumpukan debu; dan
- 5) Menggunakan alat pemadam api yang tidak tepat.

2. Menyebabkan kebakaran

Kesalahan yang sering dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Membawa kembang api;
- 2) Tidak menggunakan sepatu dan pakaian anti-elektrostatik;
- 3) Menggunakan peralatan bersifat tidak tahan terhadap ledakan;
- 4) Menggunakan api tanpa mematuhi peraturan atau menangani api dengan salah; dan
- 5) Memperbaiki alat produksi tidak sesuai peraturan atau memperbaiki alat produksi secara tidak sempurna.

3. Mengurangi efektifitas sistem tahan terhadap ledakan

Kesalahan yang sering dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Salah memasang peralatan tahan terhadap ledakan;

- 2) Melepas sambungan atau merusak peralatan keamanan;
- 3) Menggunakan jalur ledakan yang aman atau mengevakuasi saluran; dan
- 4) Berada di area dengan potensi bahaya *dust explosion* dalam waktu lama.

Beberapa tindakan yang dapat dilakukan untuk mengurangi terjadinya *human error* di perusahaan yang dapat menyebabkan *dust explosion*, diantaranya adalah (Gong Li & Baozhi Chen, 2006):

1. Memberikan pendidikan tentang keselamatan di perusahaan

Pendidikan keselamatan sebaiknya mencakup pendidikan tentang kebijakan dan peraturan nasional tentang keselamatan. Selain itu, pengetahuan tentang keselamatan perlu diberikan pada pengusaha dan manajer. Pengetahuan tentang *dust explosion* bisa didapat melalui membaca, mendengarkan pembelajaran, berbicara dengan ahli, dan melihat simulasi *dust explosion*. Perusahaan harus meningkatkan budaya keselamatan kerja dan kesadaran akan keselamatan pada pekerja.

2. Memperkuat tindakan pengendalian administrasi terhadap keselamatan di perusahaan

Tindakan pengendalian administrasi yang baik dapat memastikan tindakan pencegahan terhadap *human error* diterapkan secara efektif dan berkelanjutan. Beberapa hal yang dapat dilakukan, seperti: pengaturan proses produksi, mewajibkan bekerja sesuai ijin kerja, serta meninjau dan menyediakan proses kerja.

Selain tindakan pencegahan dan pengendalian di atas, NFPA merekomendasikan beberapa tindakan lainnya. NFPA merupakan standar yang biasa digunakan sebagai pedoman untuk menentukan adanya potensi bahaya *dust*

explosion di perusahaan dan tindakan pencegahan serta pengendalian yang dapat dilakukan untuk mengurangi bahaya *dust explosion*.

NFPA 654 merekomendasikan beberapa tindakan pengendalian debu untuk mencegah terjadinya ledakan, yaitu:

1. Meminimalisasi keluarnya debu dari alat produksi dan sistem ventilasi;
2. Penggunaan sistem pengumpulan debu;
3. Pembuatan permukaan yang dapat mengurangi kemungkinan adanya akumulasi debu;
4. Tersedianya ijin inspeksi ke seluruh area tersembunyi;
5. Mengadakan inspeksi keberadaan debu secara rutin di area terbuka maupun tersembunyi;
6. Membersihkan sisa-sisa debu hasil proses produksi secara rutin;
7. Jika terdapat sumber ignisi, menggunakan metode pembersihan yang tidak dapat menghasilkan awan debu;
8. Lokasi katup keluar dari jalur ledakan harus berada jauh dari area bahaya debu; dan
9. Mengembangkan dan menerapkan program tertulis untuk inspeksi debu, *housekeeping*, dan pengawasan

Sedangkan, tindakan pengendalian sumber ignisi untuk mencegah terjadinya ledakan, yaitu:

1. Penggunaan peralatan listrik dan metode pemasangan kabel yang tepat;
2. Pengawasan listrik statis;
3. Pengawasan asap, api terbuka, dan loncatan bunga api;

4. Pengawasan gesekan permukaan dan loncatan bunga api oleh mesin;
5. Penggunaan alat terpisah untuk material di luar proses produksi yang bersifat mudah terbakar;
6. Memisahkan permukaan panas dari debu;
7. Memisahkan proses kerja panas dari debu; dan
8. Melakukan perawatan terhadap alat-alat produksi.

2.1.1.6 Kerugian Akibat *Dust Explosion*

Setiap kecelakaan kerja termasuk kebakaran dan ledakan adalah suatu kerugian dan kerusakan baik pada manusia, harta benda, properti, maupun proses produksi. Pada dasarnya, akibat dari peristiwa kecelakaan dapat dilihat dari besar kecilnya biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan terhadap peristiwa tersebut. Kerugian akibat kecelakaan termasuk kebakaran dan ledakan tidaklah kecil dan dapat mempengaruhi produktivitas kerja suatu perusahaan. Secara garis besar, kerugian akibat kecelakaan kerja dapat dikelompokkan menjadi (Tarwaka, 2012):

1. Kerugian/biaya langsung (*Direct costs*)

Kerugian langsung adalah kerugian yang dapat dihitung secara langsung dari mulai terjadi peristiwa hingga tahap rehabilitasi, seperti:

- 1) Biaya pertolongan pertama pada kecelakaan;
- 2) Biaya pengobatan dan perawatan;
- 3) Biaya angkut dan biaya rumah sakit;
- 4) Biaya kompensasi pembayaran asuransi kecelakaan;
- 5) Upah selama tidak mampu bekerja; dan
- 6) Biaya perbaikan peralatan rusak, dll.

2. Kerugian/biaya tidak langsung (*Indirect costs*)

Kerugian tidak langsung adalah kerugian atau biaya yang dikeluarkan secara tidak terlihat pada waktu atau beberapa waktu setelah kecelakaan terjadi, kerugian ini diantaranya:

- 1) Penderitaan tenaga kerja yang mendapat kecelakaan kerja dan keluarganya;
- 2) Hilangnya waktu kerja dari tenaga kerja yang mendapat kecelakaan;
- 3) Hilangnya waktu kerja dari tenaga kerja lain, seperti: rasa ingin tahu dan rasa simpati untuk memberikan pertolongan pada korban;
- 4) Terhentinya proses produksi untuk sementara, kegagalan pencapaian target, dll;
- 5) Kerugian akibat kerusakan mesin, perkakas, atau peralatan kerja lain; dan
- 6) Biaya pendidikan dan sosial.

Tidak hanya kerugian di atas, insiden *dust explosion* sangatlah besar hingga mampu menghancurkan seluruh bangunan pabrik serta lingkungan sekitar, termasuk petugas pemadam yang bertanggung jawab untuk memadamkan api saat kejadian. Hal tersebut dikarenakan jangkauan ledakan dari *dust explosion* sekunder sangat jauh akibat penyebaran awan debu yang dihasilkan oleh ledakan sebelumnya, dan akan kembali meledak apabila terkena panas hasil pembakaran dari ledakan sebelumnya. Selain itu, ledakan ini biasanya terjadi secara tidak terduga.

2.1.2 Analisis Bahaya *Dust Explosion*

Analisis bahaya terbagi menjadi beberapa metode sistematis yang berbeda untuk mengidentifikasi bahaya yang berkaitan dengan proses produksi maupun pabrik. Analisis ini dapat digunakan sebagai dasar pemilihan tindakan pencegahan

dan pengendalian *dust explosion*. Beberapa teknik analisis yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi bahaya *dust explosion* adalah (Eckhoff, 2003):

1. *Hazard Surveys or Inventories*

Teknik analisis ini merupakan persiapan penting untuk banyak studi keselamatan. Survei yang dilakukan terdiri dari pembuatan inventarisasi bahan berbahaya dan pencatatan rincian yang relevan dengan kondisi penyimpanan. Saat dilakukan pada tahap konseptual sebuah proyek, survei ini berperan untuk pengoptimalan tata letak dan memberikan saran untuk mengurangi jumlah bahan yang tersimpan. Teknik ini menghasilkan informasi yang dapat digunakan dalam persiapan penilaian risiko.

2. *Hazard and Operability Studies (HAZOP)*

HAZOP memperkenalkan metode sistematis untuk mengidentifikasi kegagalan dengan melibatkan pengamatan sejumlah besar kemungkinan terjadinya penyimpangan dari kondisi operasi normal, yang dihasilkan dengan menerapkan kata-kata panduan seperti *more*, *less*, dan *reverse*, ke setiap parameter yang menggambarkan kondisi proses di setiap komponen perusahaan, atau barisan produksi di pabrik.

3. *Failure Modes and Effect Analysis (FMEA)*

FMEA memiliki tujuan dan pendekatan yang sama dengan HAZOP, namun lebih sederhana dibandingkan dengan analisis HAZOP. Prosedur teknik ini adalah setiap item dan komponen perusahaan dianalisis kemungkinan kegagalan dan konsekuensi yang diakibatkan apabila terjadi kegagalan. Hasilnya kemudian dicatat dalam format standar dimana rekomendasi untuk tindakan dapat disertakan. Kelemahan FMEA adalah tidak adanya metode yang ditentukan untuk mengidentifikasi kegagalan dan akibatnya.

4. *Fault Tree Analysis*

Metode ini diterapkan pada sistem yang kompleks, baik karena sifat proses itu sendiri atau instrumen yang dibutuhkan untuk menjalankan proses. Teknik dasar analisis pohon kegagalan adalah dengan mengidentifikasi kegagalan terlebih dahulu. Kegagalan ini disebut dengan *top event*. Dalam hal ini *top event* adalah *dust explosion*, yang selanjutnya semua peristiwa atau kombinasi peristiwa yang dapat mengarah langsung ke *dust explosion* diidentifikasi. Hubungan logis yang tepat antara sebab dan akibat digambarkan melalui gerbang AND atau OR dan biasanya disajikan dalam bentuk diagram.

2.1.2.1 *Fault Tree Analysis*

2.1.2.1.1 *Konsep Dasar Analisis Pohon Kegagalan*

Fault tree analysis merupakan analisis kegagalan deduktif yang berfokus pada salah satu kejadian yang tidak dikehendaki dan yang menyediakan metode untuk menentukan penyebab dari suatu kejadian. Pemilihan *top event* menjadi kunci sukses dari analisis yang dilakukan. Apabila *top event* terlalu umum, maka analisis akan menjadi tidak teratur, namun apabila *top event* terlalu spesifik maka analisis tidak dapat menyediakan sistem yang luas (Goldberg et al., 1981).

Penentuan *top event* terlebih dahulu harus dilakukan dalam analisis pohon kegagalan. Selanjutnya semua kejadian yang dapat menimbulkan akibat dari *top event* tersebut diidentifikasi dalam bentuk pohon logika ke arah bawah. Lalu dengan mengetahui kemungkinan penyebab kejadian, probabilitas dari *top event* dapat dihitung (Ramli, 2010).

Menurut Priyanta (2000) dalam Adinda Febby (2014), tahapan dalam melakukan *fault tree analysis* adalah sebagai berikut (Tarwaka, 2012):

1. Mendefinisikan masalah dan kondisi batas dari suatu sistem yang ditinjau

Langkah ini bertujuan untuk mencari *top event* yang merupakan definisi kegagalan dari suatu sistem.

2. Penggambaran model grafis pohon kegagalan

Model grafis FTA memuat simbol kejadian dan simbol gerbang. Simbol kejadian merupakan simbol yang berisi kejadian pada sistem. Sedangkan simbol gerbang adalah simbol yang menyatakan hubungan kejadian *input* yang mengarah pada kejadian *output*.

3. Mencari *minimal cut set* dari analisis FTA

Minimal cut set adalah kombinasi terkecil dari komponen kegagalan yang mana apabila terjadi akan menyebabkan terjadinya *top event*. Setiap pohon kegagalan memiliki beberapa *minimal cut set*. *Minimal cut set* satu komponen mewakili kesalahan *single* yang dapat menyebabkan *top event* terjadi. Sedangkan, *minimal cut set* dua komponen mewakili kesalahan *double* yang ketika bersama akan menyebabkan terjadinya *top event* (Goldberg et al., 1981).

4. Menganalisis pohon kesalahan secara kualitatif

Langkah ini adalah mencari *minimal cut set* menggunakan Aljabar Boolean, yaitu aljabar yang dapat digunakan untuk penyederhanaan atau menguraikan rangkaian logika yang rumit menjadi rangkaian logika sederhana. *Minimal cut set* yang telah didapat kemudian disusun sesuai dengan ukurannya. Satu komponen disusun lebih dulu, kemudian dua komponen, dan seterusnya (Goldberg et al., 1981).

5. Menganalisis pohon kesalahan secara kuantitatif

Setelah mendapatkan *minimal cut* set, kemudian dilakukan analisis kuantitatif. Analisis FTA secara kuantitatif menggunakan teori reliabilitas atau dapat didefinisikan sebagai nilai probabilitas bahwa suatu komponen atau suatu sistem akan sukses menjalani fungsinya, dalam jangka waktu dan operasi tertentu. Keandalan bernilai di antara 0 hingga 1, dimana 0 menunjukkan sistem gagal menjalankan fungsinya, dan 1 menunjukkan sistem berfungsi 100%.

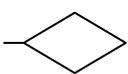
2.1.2.1.2 Elemen Dasar Pohon Kegagalan

Secara singkat *fault tree analysis* dapat dideskripsikan sebagai teknik analisis dimana bagian dari suatu sistem yang tidak dikehendaki akan ditentukan, kemudian sistem tersebut akan dianalisis sesuai dengan konteks lingkungan dan operasionalnya untuk mencari penyebab paling kredibel dari terjadinya suatu kejadian tidak dikehendaki.

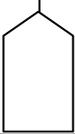
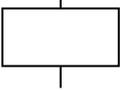
Simbol-simbol dalam pohon kegagalan ada 4 tipe, yaitu sebagai berikut:

1. *Primary events symbols*
2. *Intermediate event symbols*
3. *Gate symbols*
4. *Transfer symbols*

Tabel 2.2 Simbol Pohon Kegagalan

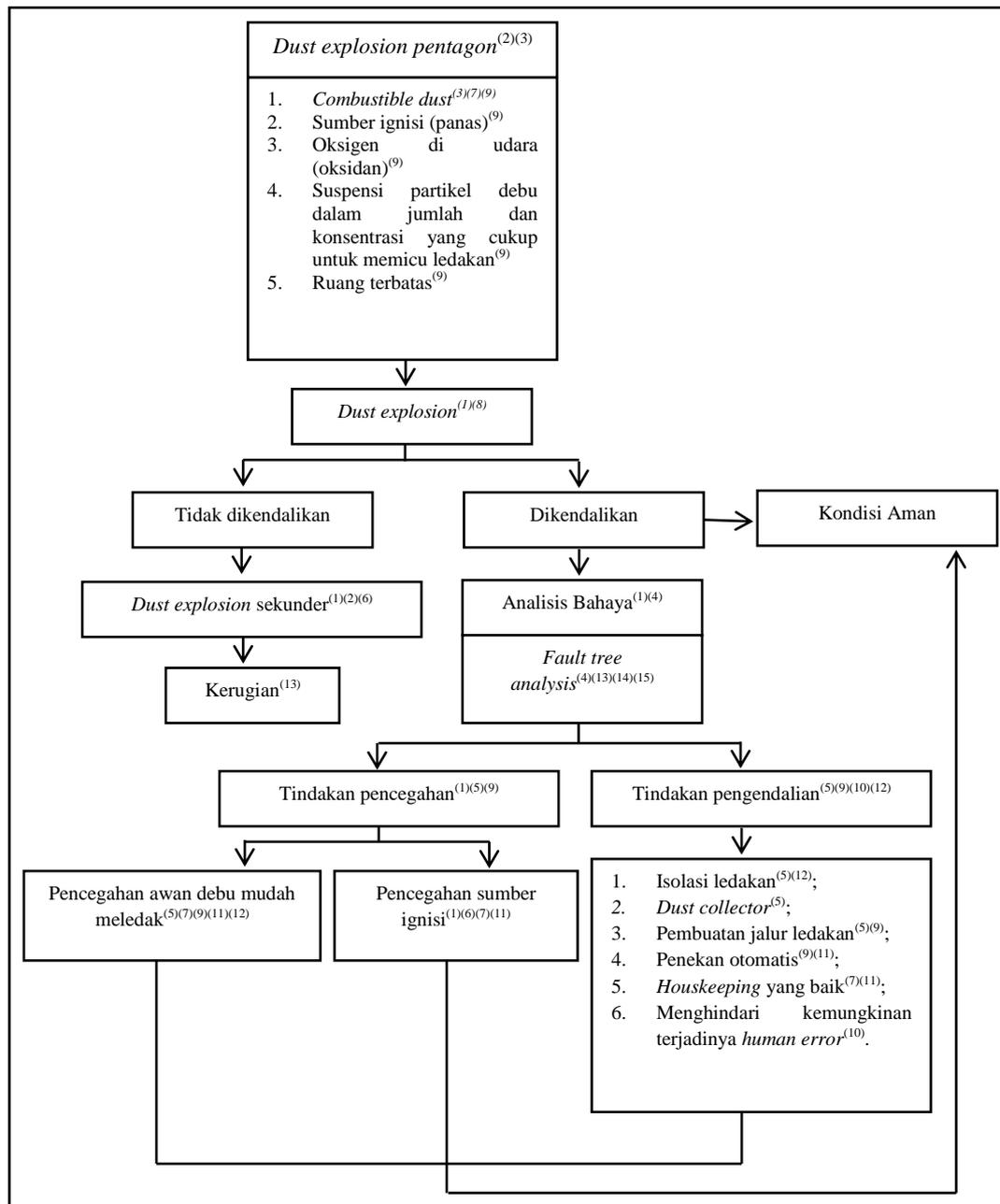
Event	Simbol	Nama	Deskripsi
<i>Primary Event Symbols</i>		<i>Basic Event</i>	Dasar penyebab kesalahan dan tidak memerlukan pengembangan lebih lanjut.
		<i>Conditioning Event</i>	Kondisi tertentu yang digunakan untuk setiap gerbang logika (terutama digunakan dengan gerbang "PRIORITAS DAN" dan "INHIBIT").
		<i>Undeveloped Event</i>	Suatu kejadian yang tidak dikembangkan lebih lanjut karena ketidakcukupan konsekuensi atau karena tidak tersedianya informasi.

Lanjutan Tabel 2.2

Event	Simbol	Nama	Deskripsi
			
<i>Intermediate Event Symbols</i>		<i>Intermediate Event</i>	Kejadian kegagalan yang terjadi karena satu atau lebih penyebab sehingga perlu dikembangkan lebih lanjut
<i>Gate Symbols</i>		<i>And</i>	Output kegagalan terjadi jika semua kesalahan input terjadi.
		<i>Or</i>	Output kegagalan dapat terjadi jika setidaknya satu dari input kegagalan terjadi.
		<i>Priority And</i>	Output kegagalan terjadi jika semua input kesalahan terjadi dalam urutan tertentu (urutan diwakili oleh "CONDITIONING EVENT" yang digambar ke sebelah kanan gerbang).
		<i>Exklusif Or</i>	Output kegagalan terjadi jika tepat hanya satu input kesalahan saja yang terjadi.
		<i>Inhibit</i>	Output kegagalan terjadi jika (satu) input kegagalan terjadi dengan adanya kondisi yang memungkinkan.
<i>Transfer Symbols</i>		<i>Transfer In</i>	Mengindikasikan bahwa pohon dikembangkan lebih lanjut di kejadian "TRANSFER OUT" yang koresponden (contohnya pada halaman lain).
		<i>Transfer Out</i>	Mengindikasikan bahwa porsi dari pohon harus melekat di "TRANSFER IN" yang koresponden.

Sumber: U.S. Nuclear Regulatory Commission "Fault Tree Analysis" NUREG0492 (1981)

2.2 KERANGKA TEORI



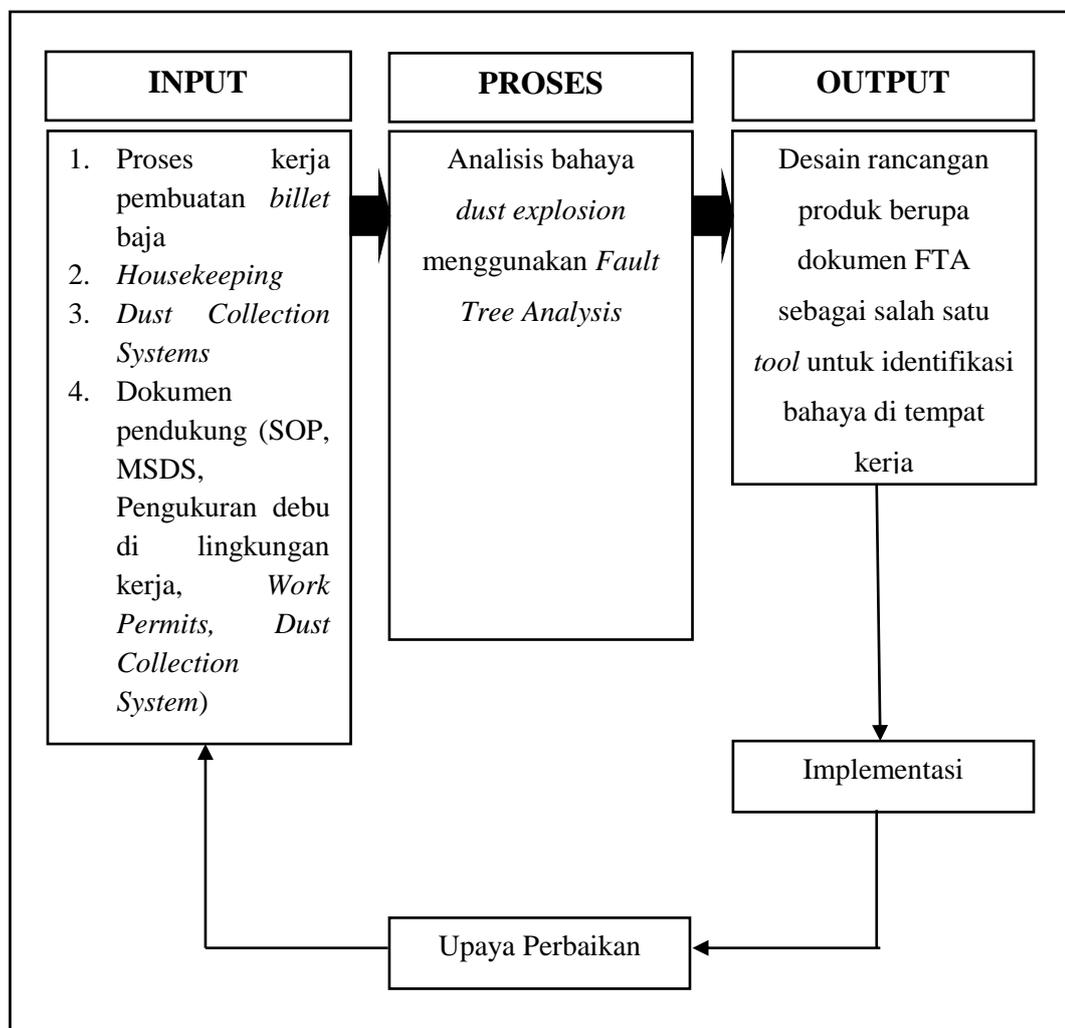
Gambar 2.2 Kerangka Teori

Sumber: Eckhoff (2003)⁽¹⁾; U.S. Chemical Safety and Hazard Identification Board (2006)⁽²⁾; OSHA (2009)⁽³⁾; U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981)⁽⁴⁾; Mayer et al. (2015)⁽⁵⁾; N.C. Department of Labor (2012)⁽⁶⁾; NFPA 654 (2013)⁽⁷⁾; Nedved & Imamkhasani (1991)⁽⁸⁾; Mendes (1999)⁽⁹⁾; Li & Chen (2006)⁽¹⁰⁾; Beattie (2013)⁽¹¹⁾; Eckhoff (2009)⁽¹²⁾; Tarwaka (2012)⁽¹³⁾; Ramli (2010)⁽¹⁴⁾; Manulang dkk.⁽¹⁵⁾.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 ALUR PIKIR

Alur pikir pada penelitian yang berjudul analisis potensi bahaya *metal dust explosion* di PT X dengan menggunakan metode *fault tree analysis* ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Alur Pikir Penelitian

3.2 FOKUS PENELITIAN

Fokus penelitian merupakan suatu batasan masalah berisi pokok masalah yang bersifat umum yang diperoleh oleh peneliti setelah melakukan penjelajahan umum (Sugiyono, 2015). Fokus dalam penelitian ini adalah analisis potensi bahaya *metal dust explosion* di PT X menggunakan metode *fault tree analysis*.

3.3 JENIS DAN RANCANGAN PENELITIAN

Jenis metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian dan pengembangan atau *Research and Development* (R&D) level 1. *Research and Development* adalah metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan rancangan produk baru, menguji keefektifan produk yang telah ada, serta mengembangkan dan menciptakan produk baru (Sugiyono, 2017). *Research and Development* level 1 merupakan jenis metode penelitian dan pengembangan yang berada pada tingkat terendah yaitu peneliti melakukan penelitian untuk menghasilkan rancangan, tetapi tidak dilanjutkan dengan membuat produk dan mengujinya. Penelitian yang dilakukan hanya menghasilkan rancangan produk yang kemudian divalidasi secara internal (para ahli dan praktisi), tetapi tidak diproduksi atau tidak diuji secara eksternal (pengujian lapangan) (Sugiyono, 2017).

Desain rancangan yang dipilih oleh peneliti dilakukan sesuai langkah-langkah berikut:

1. Identifikasi bahaya dan analisis awal terhadap sistem yang akan dianalisis; dan
2. Penyusunan *Fault Tree Analysis* secara general dari keseluruhan sistem.

3.4 SUMBER INFORMASI

Penentuan informan dalam penelitian ini menggunakan teknik *purposive sampling* dimana pengambilan sumber data dilakukan dengan pertimbangan tertentu yang dibuat oleh peneliti sendiri. Sanafiah Faisal (1990) dalam Sugiyono (2015) menyatakan bahwa sampel sebagai sumber data atau informan sebaiknya memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Mereka yang menguasai atau memahami sesuatu melalui proses enkulturasi, sehingga sesuatu itu bukan sekedar diketahui melainkan juga dihayati;
2. Mereka yang tergolong sedang berkecimpung atau terlibat pada kegiatan yang tengah diteliti;
3. Mereka yang memiliki waktu yang memadai untuk dimintai informasi;
4. Mereka yang tidak cenderung menyampaikan informasi hasil kemasannya sendiri; dan
5. Mereka yang mulanya tergolong cukup asing dengan peneliti sehingga lebih menggairahkan untuk dijadikan semacam guru atau narasumber.

Informan dalam penelitian ini terdiri dari narasumber dan validator. Narasumber dari penelitian ini adalah *SHE engineer*, *SHE secretary*, *SHE officer* bagian lapangan, penanggung jawab area produksi SMSO, penanggung jawab area gudang, dan penanggung jawab *dust collector* di PT X. Sedangkan, validator dalam penelitian ini adalah ahli K3 dari Balai Keselamatan Kerja Provinsi Jawa Tengah dan dosen K3.

3.5 INSTRUMEN PENELITIAN DAN TEKNIK PENGAMBILAN DATA

3.5.1 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian merupakan alat yang digunakan untuk mengumpulkan data. Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.5.1.1 Human Instrument

Instrumen utama dari penelitian ini adalah peneliti sendiri. Peneliti berfungsi menetapkan fokus penelitian, memilih informan sebagai sumber data, melakukan pengumpulan data, menilai kualitas data, analisis data, menafsirkan data, dan membuat kesimpulan atas temuannya. Validasi terhadap peneliti sebagai instrumen dilakukan sendiri oleh peneliti melalui evaluasi diri seberapa jauh pemahaman terhadap metode penelitian dan pengembangan, penguasaan teori dan wawasan terhadap bidang yang diteliti, serta kesiapan dan bekal memasuki lapangan (Sugiyono, 2015).

3.5.1.2 Lembar Observasi

Lembar observasi dalam penelitian ini berisi tentang indikator input penelitian yang digunakan untuk mengetahui kondisi lokasi penelitian yang sebenarnya. Lembar observasi ini berisi: (1) data proses produksi pembuatan *billet* baja yang mencakup: departemen, proses produksi, dan elemen; dan (2) tabel identifikasi *fault tree analysis* (FTA) yang mencakup: proses kerja pembuatan *billet* baja, *housekeeping* yang dilakukan oleh perusahaan, dan *dust collection systems* yang diterapkan oleh perusahaan. Lembar observasi ini berguna untuk

mencatat hasil pengamatan yang kemudian dapat dianalisis penyebab terjadinya *dust explosion* yang terdapat dalam proses produksi pembuatan *billet* baja.

3.5.1.3 Alat Pendukung Lain

Alat pendukung ini digunakan agar hasil wawancara dengan informan dapat terekam dengan baik, dan peneliti memiliki bukti telah melakukan wawancara dengan informan atau sumber data. Alat pendukung tersebut antara lain adalah:

1. Buku catatan

Buku catatan ini berfungsi untuk mencatat semua percakapan dengan sumber data mengenai jawaban dari pertanyaan tidak terstruktur terkait permasalahan setelah peneliti melakukan pengamatan.

2. Recorder

Recorder berfungsi untuk merekam semua percakapan peneliti dengan informan. Penggunaan *recorder* ini digunakan setelah peneliti mendapatkan izin penggunaan oleh informan.

3. Kamera

Kamera digunakan untuk memotret kegiatan pembicaraan peneliti dengan informan. Pengambilan gambar dilakukan setelah peneliti mendapatkan izin dari informan.

3.5.2 Teknik Pengambilan Data

Teknik pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan dengan beberapa macam, yaitu:

3.5.2.1 Observasi

Teknik observasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengamatan secara terbuka dimana subjek yang diteliti mengetahui keberadaan dari pengamat dan memberikan kesempatan pada pengamat untuk mengamati peristiwa yang terjadi dan kegiatan yang dilakukan oleh subjek. Observasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah observasi terus terang atau tersamar, dimana dalam melakukan penelitian, peneliti menyatakan terus terang kepada sumber data untuk melakukan penelitian sehingga informan mengetahui sejak awal sampai akhir mengenai aktifitas peneliti, dan secara tersamar saat data yang dicari dirasa perlu untuk dirahasiakan agar peneliti diijinkan untuk melakukan observasi (Sugiyono, 2014).

Hal yang diamati dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses kerja pembuatan *billet* baja

Proses pembuatan *billet* baja merupakan proses produksi yang memiliki potensi paling besar terjadinya kebakaran dan ledakan di PT X dikarenakan proses ini menghasilkan panas yang sangat tinggi dan bahan baku mudah menyala. Pengamatan pada proses kerja pembuatan *billet* baja dilakukan guna mengetahui potensi bahaya *dust explosion* yang ada selama berlangsungnya proses kerja pembuatan *billet* baja. Peneliti melakukan pengamatan pada cara kerja alat produksi, kondisi alat produksi, dan aktifitas pekerja saat proses produksi berlangsung.

2. *Housekeeping*

Hal yang ingin diamati oleh peneliti adalah mengenai kondisi gedung pabrik tempat berlangsungnya proses produksi dan gudang penyimpanan, upaya

pemeliharaan gedung yang dilakukan oleh perusahaan, serta pemeliharaan mesin produksi.

3. *Dust collection systems*

Pengamatan dilakukan pada sistem pengumpul debu yang dilakukan oleh PT X, yaitu: *dust collector*.

3.5.2.2 Wawancara

Jenis wawancara yang dilakukan dalam pengambilan data ini adalah wawancara tidak terstruktur, dimana wawancara dilakukan secara bebas oleh peneliti tanpa menggunakan pedoman wawancara yang tersusun secara sistematis dan lengkap untuk pengumpulan datanya. Pedoman wawancara yang digunakan hanya berupa garis-garis besar permasalahan yang akan ditanyakan agar wawancara yang dilakukan tidak menyimpang dari tujuan penelitian (Sugiyono, 2015). Wawancara ini dilakukan guna mendapatkan jawaban lebih lengkap dalam lembar observasi, serta untuk mengetahui penyebab dari *dust explosion* yang dapat terjadi di PT X.

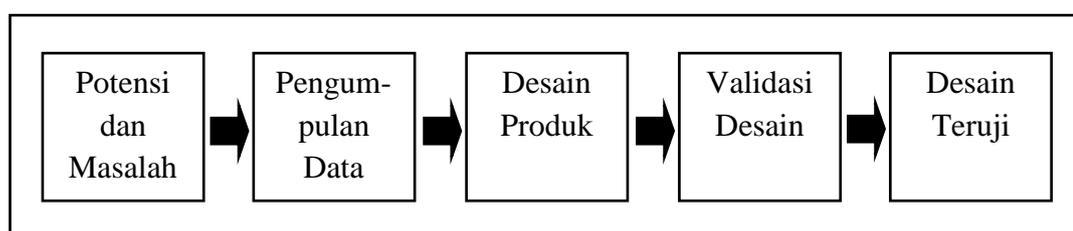
3.5.2.3 Dokumentasi

Teknik pengumpulan data dengan dokumen ini dilakukan sebagai pelengkap dari kegiatan observasi dan wawancara. Teknik ini dilakukan guna mendapatkan sumber data sekunder. Hasil dari pengamatan dan wawancara yang telah dilakukan akan menjadi lebih kredibel apabila disertai dengan dokumen pendukung. Dokumen yang akan dijadikan sumber data pendukung adalah profil perusahaan, dokumen investigasi kecelakaan kerja, *Standard Operasional Procedure (SOP)*, *Material Safety Data Sheet (MSDS)*, dokumen *dust collection*

systems, dokumen pengukuran debu di lingkungan kerja, dan dokumen peraturan kerja khusus.

3.6 PROSEDUR PENELITIAN

Prosedur atau langkah-langkah yang dilakukan dalam metode penelitian dan pengembangan ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3.2 Langkah-langkah Penelitian R&D Level 1 (Hanya Meneliti tetapi Tidak Memproduksi dan Menguji Coba)

Sumber: Sugiyono (2017)

3.6.1 Potensi dan Masalah

Langkah yang pertama kali dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah mengetahui potensi dan masalah. Proses pembuatan *billet* baja mulai dari penyaluran bahan baku *scrap* dari gudang penyimpanan ke dalam proses produksi, peleburan *scrap*, hingga proses akhir pembentukan *billet* baja memiliki potensi bahaya yang besar, seperti: kecelakaan kerja, kebakaran, ledakan termasuk *dust explosion*. Potensi bahaya *dust explosion* di perusahaan diketahui melalui kegiatan observasi dengan menggunakan lembar daftar proses produksi pembuatan *billet* baja.

3.6.2 Pengumpulan Data

Langkah berikutnya adalah melakukan pengumpulan data terkait potensi dan masalah tersebut, serta tindakan pengendalian yang sesuai. Pengumpulan data didapatkan dari hasil observasi lapangan menggunakan lembar tabel identifikasi

awal FTA dan wawancara. Data yang didapat kemudian akan digunakan sebagai bahan perancangan desain *fault tree analysis*.

3.6.3 Desain Produk

Langkah berikutnya adalah merancang desain produk, dalam hal ini berupa pembuatan dokumen *Fault Tree Analysis* (FTA) (Lampiran 16). Desain dibuat berdasarkan pengisian *draft* rancangan FTA yang berisi identifikasi penyebab terjadinya *dust explosion* dalam proses pembuatan *billet* baja mulai dari proses kerja hingga pemeliharaan gedung dan mesin.

3.6.4 Validasi Desain

Setelah desain produk terbentuk, kemudian dilakukan validasi desain produk menggunakan *worksheet* penilaian berdasarkan pemikiran rasional (belum berdasarkan fakta lapangan). Validasi desain produk dilakukan oleh para ahli yang sudah berpengalaman untuk menilai produk baru yang dirancang tersebut. Pada tahap validasi desain dilakukan pengujian internal berdasarkan pendapat ahli dan praktisi terhadap rancangan produk tersebut, dimana para ahli dan praktisi tersebut diminta untuk memberikan penilaian dan saran perbaikan terhadap rancangan produk. Penilai untuk melakukan validasi desain dalam penelitian ini adalah ahli K3 dari Balai Keselamatan Kerja Provinsi Jawa Tengah dan dosen K3. Validasi desain *worksheet* penilaian mencakup:

1. Desain *template* FTA; dan
2. Komponen konstruksi bagan FTA.

3.6.5 Desain Teruji

Revisi desain dilakukan oleh peneliti sendiri dengan pendampingan pakar dalam hal ini adalah dosen pembimbing. Perbaikan dilakukan sesuai dengan penilaian dan saran dari penilai desain. Desain produk yang sudah diperbaiki

kemudian menjadi desain produk yang teruji secara internal. Rancangan produk ini hanya berhenti sampai menghasilkan rancangan teruji secara internal, tidak dibuat menjadi produk dan diuji lapangan/penggunaannya.

3.7 TEKNIK ANALISIS DATA

Analisis data merupakan suatu proses mencari dan menyusun secara sistematis data yang diperoleh dari hasil wawancara, catatan lapangan, dan dokumentasi, dengan cara mengorganisasikan data ke dalam kategori, menjabarkan ke dalam unit-unit, melakukan sintesis, menyusun ke dalam pola, memilih yang penting untuk dipelajari, dan membuat simpulan sehingga mudah dipahami oleh diri sendiri maupun orang lain (Sugiyono, 2015). Teknik analisis data pada *Research and Development* tergantung pada level penelitian. Kegiatan analisis data pada level 1 dilakukan pada saat melakukan penelitian untuk menemukan potensi dan masalah yang akan digunakan sebagai bahan untuk perancangan produk. Rancangan produk tersebut diuji internal melalui pendapat ahli dan praktisi (Sugiyono, 2017).

3.7.1 Penyajian Data

Penyajian data ini dapat dilakukan dalam bentuk teks naratif, grafik, *network*, matrik, dan *chart* (Sugiyono, 2015). Data pada penelitian ini disajikan dalam bentuk gambar, tabel, dan narasi.

3.7.2 Penarikan Simpulan dan Verifikasi

Simpulan yang kredibel adalah simpulan yang didukung dengan bukti valid dan konsisten saat peneliti kembali ke lapangan untuk mengumpulkan data (Sugiyono, 2015).

BAB VI

PENUTUP

6.1 SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis potensi bahaya *metal dust explosion* pada proses pembuatan *billet* baja di PT X menggunakan *Fault Tree Analysis* diketahui bahwa terdapat 75 *single minimal cut set* dimana paling banyak adalah terkait desain gedung atau fasilitas dan 3 *double minimal cut set* berupa: debu terbawa angin dan mahalnnya biaya pengendalian, debu terbawa angin dan desain gedung yang tidak dapat diubah, serta ruangan sempit dan ukuran gedung terlalu besar, sebagai kombinasi kejadian-kejadian dasar yang dapat menjadi penyebab terjadinya *metal dust explosion* di PT X.

Berdasarkan penghitungan *minimal cut set* diketahui penyebab dasar yang dapat menyebabkan terjadinya *metal dust explosion* dalam pembuatan *billet* baja ini dapat dikelompokkan menjadi beberapa *cluster* yaitu berupa: tidak adanya penimbangan atau kurangnya akurasi timbangan, *human error*, rendahnya sumber daya manusia, pemenuhan peningkatan jumlah produksi, lamanya waktu pemakaian mesin, terbatasnya waktu dan biaya, penggunaan komponen bekas, ketiadaan SOP, tidak adanya identifikasi bahaya, faktor alam, desain fasilitas atau gedung, tidak adanya ijin kerja, lemahnya kebijakan dan pembaruan standar, kondisi mata operator, usia mesin yang sudah tua, kurangnya pengetahuan tentang *dust explosion*, kurangnya informasi tentang *dust explosion*, kurangnya kepedulian akan bahaya dari *dust explosion*, tidak adanya pelabelan dan MSDS

pada bahan berbahaya, tidak adanya *safety sign*, tidak adanya zona merokok, lemahnya program inspeksi dan program kebersihan, rendahnya pelaksanaan pembersihan atau *housekeeping*, adanya kebocoran pada *duct dust collector*, adanya hubungan pendek, dan banyaknya residu debu dari proses produksi.

6.2 SARAN

Saran yang dapat diberikan berdasarkan dari simpulan di atas di antaranya adalah sebagai berikut:

6.2.1 Perusahaan

1. Penggantian penggunaan kompresor dengan alat penyedot debu khusus debu logam saat melakukan pembersihan debu di tempat produksi dan tempat penyimpanan bahan baku *sponge iron*.
2. Penggantian penggunaan sapu yang memiliki bulu sintetis dengan sapu dengan bulu halus yang terbuat dari serat alami saat melakukan pembersihan debu di tempat kerja dan tempat penyimpanan bahan baku.
3. Penggantian Alat Pemadam Api Ringan (APAR) tipe Kelas A, B, C, dengan APAR tipe Kelas D.
4. Penyediaan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) tipe Kelas D di setiap bangunan proses produksi dan gudang bahan baku dengan jarak antar APAR adalah 15 meter.
5. Pembuatan desain atap bangunan produksi dan gudang yang dapat meminimalisasi adanya akumulasi debu di udara, seperti: desain bentuk atap gergaji atau atap datar (Lampiran 9).

6. Pembuatan pintu pada bangunan gudang bahan baku *sponge iron*.
7. Pembuatan ventilasi alami pada bangunan produksi dan gudang bahan baku.
8. Pelaksanaan pemberian jeda produksi selama satu jam setiap proses produksi tujuh jam atau melakukan rotasi penggunaan mesin seperti: *bucket, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine* untuk menambah usia kerja mesin dan mengurangi risiko terjadinya permukaan panas yang dapat menjadi sumber ignisi terjadinya *dust explosion*.
9. Perawatan dan pemeliharaan mesin seperti: *bucket, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine, conveyor belt, dust collector, crane, hopper* secara berkala setiap satu bulan sekali, setiap terjadi kerusakan mesin, atau saat penggantian mesin baru.
10. Pembersihan mesin seperti: *bucket, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine, conveyor belt, dust collector, crane, hopper*, rel secara menyeluruh dalam kondisi mesin mati dan dilakukan secara berkala paling tidak setiap hari sebelum memulai proses produksi atau saat proses *shut down* setiap satu bulan sekali.
11. Pembersihan setiap bagian gedung produksi dan gudang bahan baku seperti: dinding, lantai, atap, langit-langit, permukaan horizontal dinding, dan permukaan balok penyangga bangunan agar tidak ada akumulasi debu maupun genangan air yang dapat menyebabkan ledakan.
12. Pembersihan bangunan produksi dan gudang bahan baku secara berkala paling tidak setiap hari setelah proses produksi berakhir, setiap satu minggu sekali, atau saat *shut down* setiap satu bulan sekali.

13. Pembersihan perangkat listrik seperti: trafo dan kabel paling tidak setiap satu tahun sekali.
14. Pengadaan inspeksi kebersihan seperti: adanya akumulasi debu, adanya genangan air, kerapian kabel secara berkala paling tidak setiap hari setiap seperempat waktu keseluruhan proses produksi.
15. Pengadaan inspeksi kondisi mesin seperti: *bucket, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine, conveyor belt, dust collector, crane, hopper*, rel secara menyeluruh oleh penanggung jawab mesin yang memahami cara kerja dan bahaya mesin dan dilakukan secara berkala paling tidak setiap hari sebelum penggunaan mesin, saat penggunaan mesin, dan setelah penggunaan mesin.
16. Pembuatan manual berisi kebijakan-kebijakan terkait *dust explosion* sesuai dengan standar internasional tentang *dust explosion* dan komitmen anggaran terhadap upaya pengendalian dan pencegahan *dust explosion*.
17. Pembuatan *Standard Operating Procedure* (SOP) terkait upaya pengendalian dan pencegahan *dust explosion*, seperti: SOP pelaksanaan *housekeeping* bangunan dan mesin, SOP penanganan padatan logam, bubuk logam, dan debu logam mudah terbakar, SOP penanganan sumber bahaya, SOP pengukuran debu, SOP evaluasi kepatuhan pekerja, SOP inspeksi kebersihan gedung dan mesin, SOP penanganan insiden, SOP identifikasi bahaya dan penilaian risiko *dust explosion*, SOP inspeksi kondisi mesin, SOP kalibrasi alat ukur, peralatan inspeksi, dan alat uji, SOP pemeriksaan alat angkut berat, SOP sertifikasi sarana produksi dan operator, SOP

pelaksanaan pemberian pelatihan terkait penanganan bahan mudah terbakar dan sumber ignisi, serta SOP penggunaan Alat Pelindung Diri (APD).

18. Pembuatan instruksi kerja untuk mengurangi terjadinya *human error* yang dapat menyebabkan *dust explosion*, seperti: instruksi kerja inspeksi bahan mudah terbakar, instruksi kerja pengoperasian *crane*, instruksi kerja pengoperasian *electric arc furnace*, instruksi kerja pengoperasian *ladle refining furnace*, instruksi kerja pengoperasian *continuous casting machine*, instruksi kerja pembersihan bangunan produksi dan tempat penyimpanan bahan, instruksi kerja penyimpanan bahan mudah terbakar, instruksi kerja panas, dan instruksi kerja di ruang terbatas.
19. Pembuatan formulir dan melakukan *record* terkait upaya pencegahan dan pengendalian *dust explosion*, seperti: formulir inspeksi kebersihan, formulir inspeksi mesin (*crane, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine, dust collector*), formulir identifikasi bahaya dan penilaian risiko *dust explosion*, formulir ijin kerja, formulir evaluasi pelatihan, dan formulir penyimpanan dan penanganan bahan mudah terbakar.
20. Pengawasan manual, prosedur, instruksi kerja, dan dokumen *record* secara berkala yaitu setiap satu tahun sekali, setiap terjadi perubahan proses kerja, dan setiap terjadi kecelakaan.
21. Pengadaan *safety education* terkait *dust explosion* pada seluruh pihak manajemen seperti: pembuat kebijakan, manajer, dan supervisor paling tidak setiap satu tahun sekali untuk meningkatkan pengetahuan dan kepedulian terhadap bahaya *dust explosion*.

22. Pengadaan pelatihan pada pekerja setiap satu minggu sekali terkait dengan upaya pengendalian dan pencegahan terhadap bahaya *dust explosion* di perusahaan logam, seperti: pelatihan pembersihan tempat kerja untuk mengurangi akumulasi debu, pelatihan penanganan bahan dan debu logam mudah terbakar, pelatihan pengoperasian mesin sesuai dengan prosedur, pelatihan pelaksanaan inspeksi, dan pelatihan penanganan sumber panas.
23. Pemasangan MSDS (*Material Safety Data Sheet*) yang mudah dipahami oleh pekerja di setiap tempat produksi yang menggunakan atau menyimpan bahan mudah terbakar yang berpotensi menyebabkan *dust explosion*, seperti: *ferromanganese dan silicomanganese* (Lampiran 10).
24. Pemasangan *safety sign* di tempat yang memiliki potensi bahaya *dust explosion* dan dapat dilihat dengan jelas (Lampiran 11).
25. Pemberian sanksi tegas berupa surat peringatan hingga pemecatan jika melakukan pelanggaran berkali-kali kepada pekerja yang membawa sumber api selain untuk keperluan produksi seperti: rokok, korek api, atau kembang api ke dalam gedung produksi dan gudang penyimpanan.
26. Penyediaan Alat Pelindung Diri (APD) yang bersifat konduktif untuk mencegah terjadinya listrik statis seperti sarung tangan listrik, dan menyediakan pakaian anti api dan anti ledakan.

6.2.2 Pekerja

1. Pekerja mematuhi kebijakan yang telah dibuat oleh perusahaan terutama terkait dengan pencegahan dan pengendalian terhadap bahaya *metal dust explosion*, seperti: tidak merokok di dalam tempat produksi,

mengoperasikan mesin seperti: *crane, dust collector, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine* sesuai dengan prosedur yang dibuat perusahaan, dan melakukan inspeksi mesin dan kebersihan.

2. Pekerja melakukan perawatan mesin seperti *bucket, arc furnace, ladle refining furnace, continuous casting machine, conveyor belt, dust collector, crane, hopper* sesuai dengan prosedur yang dibuat perusahaan.
3. Pekerja melakukan pembersihan sesuai dengan keputusan perusahaan, seperti: membersihkan menggunakan alat penyedot debu khusus atau sapu dengan bulu halus yang terbuat dari serat alami, serta melakukan pembersihan secara menyeluruh dan sesuai waktu yang diharuskan perusahaan.
4. Pekerja bertanggung jawab melakukan pengecekan kondisi mesin yang digunakan sebelum mesin mulai beroperasi, saat beroperasi, dan setelah beroperasi.

6.2.3 Peneliti Selanjutnya

Peneliti selanjutnya diharapkan dapat melanjutkan penelitian R&D level 1 ini dengan melakukan perbaikan pada rancangan desain produk ini untuk kemudian dilakukan uji coba secara eksternal.

DAFTAR PUSTAKA

- Addawiyah, A. S., & Windraswara, R. (2016). Pengembangan Risk Assessment dalam Evaluasi Manajemen Penanggulangan Kebakaran Melalui Fault Tree Analysis. *Unnes Journal of Public Health*. 5(1): 36-47.
- Andani, R., & Hariyono, W. (2017). Penerapan Standar Operasional Prosedur Perilaku Selamat dan Kecelakaan Kerja di Pabrik Gula Tasikmadu Karanganyar. *Prosiding Seminar Nasional IKAKESMADA "Peran Tenaga Kesehatan dalam Pelaksanaan SDGs"* (pp. 181-190). Yogyakarta: Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Ahmad Dahlan.
- Atikah, T., D, I. H., & Marom, A. (n.d.). *Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Upaya Pencegahan Kecelakaan Kerja pada Lingkup Industri di Kota Semarang*. Retrieved Januari 20, 2019. Web Site: <https://media.neliti.com/media/publications/91043-ID-implementasi-sistem-manajemen-keselamata.pdf>
- Australia/New Zealand Standard. (2012). *AS/NZS ISO 31000: 2009 dalam Risk Management Frame Work*. Government of South Australia.
- Bab II Dasar Teori* (n.d.). Retrieved 12 Januari 2018, from Web Site: <http://digilib.polban.ac.id/files/disk1/96/jbptppolban-gdl-adityaperm-4754-3-bab2--3.pdf>.
- Beattie, W. S. (2013). Combustible Dust: Elements of Dust Hazard Assessment. *A Technical Publication of ASSE's Fire Protection Practice Specialty*. 6(2): 1-16.
- Budiono, I., Mardiana, Fauzi, L., & Nuhroho, E. (2017). *Pedoman Penyusunan Skripsi Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Negeri Semarang Tahun 2017*. Semarang: Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Keolahraan, Universitas Negeri Semarang.
- Combustible Dust* (n.d.). Retrieved Mei 25, 2016, from Oregon OSHA Web Site: <http://www.osha.gov/dts/shib/shib073105.html>.
- Costella, M. F., Pilz, S. E., & Bet, A. (2016). Dust Sample Collection and Analysis Method for Assessing the Risk of Explosions of Dust in Suspension in Grain Receiving and Storing Units. *Gest. Prod., Sao Carlos*. Retrieved Juni 14, 2017, from SCIELO Web Site: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104530X2016000300503&script=sci_arttext&tlng=en.

- Definisi Metode Deskriptif*. (2012). Retrieved Juli 16, 2017, from Web Site: <http://www.idtesis.com/metode-deskriptif/>
- Ebadat, V., & Prugh, R. W. (2007). Case Study: Aluminium-Dust Explosion. *Loss Prevention Symposium*. No. X.
- Eckhoff, R. K. (2003). *Dust Explosion in the Process Industries*. 3rd Edition. USA: Elsevier Science.
- Eckhoff, R. K. (2009). Dust Explosion Prevention and Mitigation, Status and Developments in Basic Knowledge and in Practical Application. *International Journal of Chemical Engineering*. 2009: 1-12.
- Gabriele. (2018). Analisis Penerapan Standar Operasional Prosedur (SOP) di Departemen Marketing dan HRD PT Cahaya Indo Persada. *AGORA*. 6(1).
- Goldberg, F. F., Vesely, W. E., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (1981). *Fault Tree Handbook*. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Haesch, G., Kanuga, K., Lambert, P. G., Milburn, T., Owen, O. J. R., & Ward, R. J. (2001). A Methodology for the Assessment of Dust Explosion Risk: Integration into a Generic Assessment System. *Symposium Series*. 148: 833-845.
- Himaningrum, W. Y. (2011). *Sistem Ijin Kerja sebagai Upaya Pencegahan Kecelakaan Kerja di PT Semen Gresik (PERSERO) Tbk Pabrik Tuban Jawa Timur*. Laporan Khusus. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Hossain, Md. N., Amyotte, P. R., Khan, F. I., Abuswer, M. A., Skjold, T., & Morrison, L. S. (2013). Dust Explosion Quantitative Risk Management for Nontraditional Dusts. *The Italian Association of Chemical Engineering*. 31: 115-120.
- Identify Any Sources of Ignition, Fuel, and Oxygen*. (n.d.). Retrieved Juni 14, 2017. Web Site: <https://www.firesafe.org.uk/wp-content/uploads/docs/pf/pf1.pdf>.
- Jasasila. (2017). Peningkatan Mutu Pemeliharaan Mesin Pengaruhnya terhadap Proses Produksi pada PT Aneka Bumi Pratama (ABP) di Kabupaten Batanghari. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*. 17(3): 96-102.
- Kusuma, I. J. (n.d.). *Pelaksanaan Program Keselamatan dan Kesehatan Kerja Karyawan PT. Bitratex Industries Semarang*. Retrieved Januari 20, 2019. Web Site: <https://core.ac.uk/download/pdf/11725555.pdf>

- Lasuda, Suharianti. (2010). *Analisis Terjadinya Kebakaran Akibat Listrik pada Bangunan*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Lestari, E. A. (2014). *Analisis Kesesuaian Keberadaan Safety Sign Berdasarkan Identifikasi Bahaya di Bidang Profilling Prismatic Machine Departemen Machining Direktorat Produksi PT Dirgantara Indonesia Tahun 2014*. Skripsi. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Li, G., & Chen, B. (2006). Human Errors and Dust Explosion Prevention and Protection. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*. 8(1): 1-5.
- Manullang, H., Kusmindari, D., & Pasmawati, Y. (n.d.). *Analisis Penyebab Kecelakaan Kerja dengan Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (Studi Kasus: PT Wijaya Karya)*. Retrieved Desember 10, 2018. Web Site: <https://anzdoc.com/analisis-penyebab-kecelakaan-kerja-dengan-menggunakan-metode.html>
- Mangiwa, G. G. R., Naiem, M. F., & Russeng, S. S. (n.d.). *Pelaksanaan Hazard Communication Bahan Kimia pada Perusahaan Pengecatan Mobil Kota Makassar*. Retrieved Januari 2, 2019. Web Site: <https://core.ac.uk/download/pdf/25492644.pdf>
- Mayer, G. Ph., Finley, E., & Sztarkman, H. (2015). *Explosion Protection for Dust Collection Systems Handling Metal Dust*. Retrieved Mei 23, 2016, from Power Bulk Engineering Web Site: https://www.google.co.id/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjstK68k5jVAhWJppQKHwBjC8IQFggzMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rembe.us%2Findustryinformation%2Fdocuments%2FREMBE_Explosion_Protection_for_systems_handling_metal_dusts_1115.pdf&usg=AFQjCNHgITYlbsEed5hF6y458k2YPDzaxw.
- Mendes, AGP. (1999). Dust Explosions. *Proc S Afr Sug Technol Ass*. 74: 282-288.
- Messah, Y.A., Bella, R. A., & Lolo, T. A. S. (2015). Solusi Pencegahan Kecelakaan Kerja dalam Pelaksanaan Konstruksi Gedung di Kota Kupang. *Jurnal Teknik Sipil*. 4(2): 147-158.
- Mufidah, H. (2014). *Analisis Pengaruh Jadwal Pemeliharaan terhadap Keandalan Transformator 80 MVA Berdasarkan Hasil Uji Tes DGA dan Tegangan Tembus dengan Metode Markov (Studi Kasus: Industri Peleburan Baja PT XYZ)*. Tugas Akhir. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

- Mustika, A. F. (2014). *Analisa Keterlambatan Proyek Menggunakan Fault Tree Analysis (FTA) (Studi Kasus pada Proyek Pembangunan Gedung Program Studi Teknik Industri Tahap II Universitas Brawijaya Malang)*. Retrieved Januari 7, 2018, from <http://sipil.studentjournal.ub.ac.id/index.php/jmts/article/download/116/101>.
- N.C. Department of Labor. (2012). *A Guide To Combustible Dust*. North Carolina: N.C. Department of Labor.
- Nedved, M., & Imamkhasani, S. (1991). *Dasar-Dasar Keselamatan Kerja Bidang Kimia dan Pengendalian Bahaya Besar*. Jakarta: ILO.
- National Fire Protection Association. (2002). *NFPA 484 Standard for Combustible Metals, Metal Powders, and Metal Dusts*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- National Fire Protection Association. (2014). *NFPA 51B Standard for Fire Prevention During Welding, Cutting, and Other Hot Work*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- National Fire Protection Association. (2015). *NFPA 68 Standard for Oven and Furnace*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- National Fire Protection Association. (2016). *NFPA 350 Guide for Safe Confined Space Entry and Work*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- National Fire Protection Association. (2017). *NFPA 654 Standard for the Prevention for Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- Occupational Safety and Health Administration. (2014). *Combustible Dust Housekeeping Inspection Checklist*. United State: U.S. Department of Labor.
- Pitasari, G. P., Wahyuning, C. S., & Desrianty, A. (2014). Analisis Kecelakaan Kerja untuk Meminimalisasi Potensi Bahaya Menggunakan Metode Hazard and Operability dan Fault Tree Analysis (Studi Kasus di PT X). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*. 2(2): 167-179.
- Ramli, S. (2010). *Pedoman Praktis Manajemen Risiko dalam Perspektif K3*. Jakarta: Dian Rakyat.
- Sari, L. M. (2010). *Upaya Pencegahan dan Penanggulangan Potensi Bahaya Kebakaran di Area Outer Tube Casting PT Kayaba Indonesia Bekasi Jawa Barat*. Laporan Khusus. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

- Septiansyah, R. (2014). *Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan Kelelahan Mata pada Pekerja Pengguna Komputer di PT Duta Astakona Girinda Tahun 2014*. Skripsi. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Sharma P., & Singh, A. (2015). Overview of Fault Tree Analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 4(3): 337-340.
- Sitorus, B. R. (2011). *Analisis Coal Dust Explosion Accident di PLTU X Tahun 2011*. Retrieved Mei 23, 2016, from Perpustakaan Universitas Indonesia Web Site: <http://lib.ui.ac.id/opac/ui/detail.jsp?id=20350203&lokasi=lokal>
- Sudarmiani, & Devi Novita Ningsih. (2015). Pengaruh Manajemen Sumber Daya Manusia terhadap Keselamatan Kerja Karyawan pada Kantor PLN Dolopo Kab. Madiun. *Equilibrium*. 3(2): 113-122.
- Sugiyono. (2015). *Metode Penelitian Pendidikan*. 2nd Edition. Bandung: Alfabeta.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian dan Pengembangan (Research and Development / R&D)*. 3rd Edition. Bandung: Alfabeta.
- Sulhinayatillah. (2017). *Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan Kejadian Kecelakaan Kerja pada Karyawan Bagian Produksi di PT PP London Sumatra Indonesia Tbk Palangisang Crumb Rubber Factory Bulu Kumba Sulawesi Selatan 2017*. Skripsi. Samata: Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.
- Tarwaka. (2012). *Dasar-Dasar Keselamatan Kerja serta Pencegahan Kecelakaan di Tempat Kerja*. Surakarta: Harapan Press.
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2003). *Dust Explosion at West Pharmaceutical Services*. Wahington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2006). *Investigation Report: Combustible Dust Hazard Study*. Wahington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2011). *Case Study: Hoeganaes Corporation: Gallatin, TN Metal Dust Flash Fires and Hydrogen Explosion*. Washington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2014). *Case Study: Metal Dust Explosion and Fire*. Washington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.

- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2015). *Case Study: Ink Dust Explosion and Flash Fires in East Rutherford, New Jersey*. Washington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- Widowati, Evi. (2017). *Best Practices dalam Manajemen Risiko di Perusahaan dan Insttusi*. Semarang: Cipta Prima Nusantara.
- Wiryatama, R., Asfani, D. A., Fahmi, D. (2017). Analisis Karakteristik Busur Api Listrik Tegangan Rendah pada Hubungan Sigkat Langsung melalui Sinkronisasi Penginderaan Termal Bunga Api dan Arus Hubungan Singkat. *Jurnal Teknik ITS*. 6(1): B1-B6.
- Wulandari, R., Pangaribuan, A., & Modjo, R. (2014). *Klasifikasi Hazardous Area dan Analisis Pemilihan Equipment Sesuai Standar ATEX dan IECEx di Powder Plant Frisian Flag Indonesia Tahun 2014*. Depok: Universitas Indonesia.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015). Dust Explosion: A Threat to the Process Industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 98: 57-71.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2016). Domino Effect Analysis of Dust Explosions Using Bayesian Networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 100: 108-116.
- Zoro, R. (2009). Induksi dan Konduksi Gelombang Elektromagnetik Akibat Sambaran Petir pada Jaringan Tegangan Rendah. *Makara Teknologi*. 13(1): 25-32.