



## **Analisis Potensi Bahaya *Metal Dust Explosion* Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis***

**Nurida Choirinisa Arfiyana <sup>✉</sup>, Evi Widowati <sup>1</sup>, Galuh Nita Prameswari <sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Keolahragaan, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

### **Info Artikel**

*Sejarah Artikel:*

Diterima 7 Mei 2019

Disetujui 21 Oktober 2019

Dipublikasikan 31 Oktober 2019

*Keywords:*

*dust explosion, metal, fault tree analysis*

*DOI:*

<https://doi.org/10.15294/higeia/v3i4/30202>

### **Abstrak**

Studi kasus terdahulu menunjukkan 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 perusahaan baja yang pernah mengalami ledakan pada tahun 2004 dan 2017. Penelitian ini dilaksanakan di PT X pada bulan Januari – Februari 2018. 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 level 1. Instrumen yang digunakan adalah lembar proses produksi dan lembar tabel identifikasi awal FTA dengan validasi desain menggunakan penilaian 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 sebesar masing-masing 6,5%, dapat disimpulkan bahwa kombinasi kesalahan untuk menyebabkan *metal dust explosion* terdapat 75 *single minimal cut set* yang didominasi desain fasilitas dan 3 *double minimal cut set* terbanyak adalah kombinasi dengan desain fasilitas.

### **Abstract**

*Prior case studies showed some of dust explosion cases left 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 steel manufacture with explosion cases happened on 2004 and 2017. This research was conducted in PT X in January – February 2019. 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 level 1. The instruments used were production process sheet and table of identification sheet with help of expert as design evaluator. Result showed 31,6% fault modes in steel billet production had extreme risk of dust explosion. Fault tree analysis obtained metal dust explosion basic event mostly was lack of fund and information with percentage of each were 6,5% and concluded that there were 75 single minimal cut set which were dominated by facility design and 3 double minimal cut set with mostly was combination of facility design.*

© 2019 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:

Gedung F5 Lantai 2 FIK Unnes

Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang, 50229

E-mail: [nuridaarfiyana@gmail.com](mailto:nuridaarfiyana@gmail.com)

p ISSN 1475-362846

e ISSN 1475-222656

## PENDAHULUAN

*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 (CSB, 2008). Kondisi yang memungkinkan terjadinya *dust explosion* adalah adanya awan debu secara bersamaan dengan sumber ignisi yang mendukung terjadinya pembakaran (Vijayaraghavan, 2011). Semakin besar energi yang dilepaskan selama pembakaran dan semakin cepat terjadinya pembakaran menyebabkan semakin besarnya kerusakan yang diakibatkan oleh ledakan tersebut (Lemkowitz, 2014). Terdapat banyak faktor yang dapat memengaruhi besarnya ledakan oleh ignisi pada awan debu, seperti ukuran partikel debu tersebut dan kelembaban dari awan debu. Debu dengan konsentrasi 25-500 g/m<sup>3</sup> cukup untuk dapat menjadi bahan bakar penyulut sumber api untuk pembakaran awan debu yang dapat menyebabkan terjadinya *dust explosion* (Mittal, 2013).

*Dust explosion* hanya dapat terjadi jika seluruh elemen dalam *explosion pentagon* terpenuhi. Elemen tersebut berupa bahan bakar (*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 (CSB, 2008).

Insiden ini dapat terjadi dalam dua tahap ledakan, yaitu ledakan primer dan sekunder. *Dust explosion* selalu dimulai dari ledakan primer kemudian dilanjutkan dengan ledakan sekunder. Ledakan primer terjadi di dalam bejana atau wadah yang digunakan dalam proses produksi seperti: *hopper* atau *cyclone*. Kejadian tersebut memicu lapisan debu di permukaan terangkat dan meledak menjadi ledakan sekunder (Sulaiman, 2011).

Menurut hasil analisis Yuan (2015), pada tahun 1785-2012 telah terjadi kasus *dust explosion* di dunia sebanyak 2.870 kasus, dengan 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 (CSB, 2008).

Bahaya debu mudah terbakar dan meledak salah satunya dapat ditemukan pada proses produksi dan penyimpanan logam (Vijayaraghavan, 2011). Sejumlah kasus *metal dust explosion* yang telah terjadi menyebabkan banyaknya kematian dan kerusakan yang sangat besar. 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, 2015).

Pada tahun 2014, *dust explosion* terjadi di industri otomotif China, sebanyak 146 pekerja meninggal dan lebih dari 100 korban mengalami luka-luka. 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. 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.

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.

Proses produksi yang menggunakan bahan-bahan yang dapat menyebabkan *dust explosion* yaitu 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 1500-1600°C, serta penggunaan bahan baku yang bersifat mudah menyala menyebabkan industri ini berpotensi besar untuk terjadinya *metal dust explosion*. 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 ini sendiri pernah beberapa kali mengalami ledakan yaitu pada tahun 2004 dan tahun 2017 yang membuat proses produksi berhenti sementara.

Identifikasi potensi bahaya sangat penting dilakukan untuk mengetahui risiko yang ada di tempat kerja dan pengendalian yang dapat dilakukan untuk menangani risiko tersebut. Hal itu dapat menjadi salah satu upaya pencegahan kecelakaan (Wulandari, 2017). *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, 2015). Metode ini efektif dalam menemukan inti permasalahan karena dapat memastikan suatu kejadian yang tidak diinginkan terjadi karena suatu titik kegagalan. *Fault tree analysis* terdiri dari dua tipe *events* yaitu *primary event* dan *expanded event* (Pitasari, 2014).

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 sejak penyebab dasar terjadinya *dust explosion*.

Penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya dimana penelitian mengenai analisis potensi bahaya *metal dust explosion* dengan menggunakan metode *fault tree analysis* belum pernah dilakukan sebelumnya dan jenis rancangan penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D), berbeda dengan peneliti sebelumnya berupa kualitatif deskriptif. Selain itu, fokus dalam penelitian ini adalah potensi bahaya *metal dust explosion*, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada potensi bahaya *coal dust explosion* atau *grain dust explosion*.

Oleh sebab itu, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya *metal dust explosion* di PT X menggunakan metode *fault tree analysis*.

## METODE

Jenis metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian dan pengembangan atau *Research and Development* (R&D) level 1 dengan pembuatan desain rancangan yang dipilih oleh peneliti dilakukan sesuai langkah-langkah berupa: 1) melakukan identifikasi bahaya dan analisis awal terhadap sistem yang akan dianalisis, dan 2) menyusun *Fault Tree Analysis* secara general dari keseluruhan sistem. Penelitian ini dilaksanakan pada Januari hingga Februari 2018.

Penentuan informan dalam penelitian ini menggunakan teknik *purposive sampling* dimana pengambilan sumber data dilakukan dengan pertimbangan tertentu yang dibuat oleh peneliti sendiri. 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.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa: 1) *human instrument* atau peneliti sendiri; 2) lembar

observasi yang berisi data proses produksi pembuatan *billet* baja yang mencakup departemen, proses produksi, dan elemen, serta 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; 3) alat pendukung untuk menunjang proses wawancara, yaitu berupa kamera, perekam, dan buku catatan.

Teknik pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan dengan beberapa macam, yaitu observasi, wawancara, dan studi dokumentasi. Observasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah observasi terus terang atau tersamar dengan hal yang diamati berupa proses kerja pembuatan *billet* baja (pengamatan pada cara kerja alat produksi, kondisi alat produksi, dan aktifitas pekerja saat proses produksi berlangsung), *housekeeping* ((pengamatan pada kondisi gedung pabrik tempat berlangsungnya proses produksi dan gudang penyimpanan, upaya pemeliharaan gedung yang dilakukan oleh perusahaan, serta pemeliharaan mesin produksi)), dan *dust collection system* ((pengamatan pada *dust collector*)).

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.

Dokumen yang akan dijadikan sumber data pendukung adalah profil perusahaan, dokumen investigasi kecelakaan kerja, *Standard Operational Procedure* (SOP), *Material Safety Data Sheet* (MSDS), dokumen *dust collection systems*, dokumen pengukuran debu di lingkungan kerja, dan dokumen peraturan kerja khusus.

Prosedur atau langkah-langkah yang dilakukan dalam metode penelitian dan pengembangan ini terdiri dari: 1) potensi dan masalah, diketahui melalui kegiatan observasi dengan menggunakan lembar daftar proses produksi pembuatan *billet* baja; 2) pengumpulan data, didapatkan dari hasil observasi lapangan menggunakan lembar tabel identifikasi awal

FTA dan wawancara; 3) desain produk, berupa dokumen *Fault Tree Analysis* yang 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; 4) validasi desain, dilakukan menggunakan *worksheet* penilaian berdasarkan pemikiran rasional (belum berdasarkan fakta lapangan); dan 5) desain teruji, dengan revisi desain dilakukan oleh peneliti sendiri dengan pendampingan pakar yang dalam hal ini adalah dosen pembimbing dan perbaikan dilakukan sesuai dengan penilaian dan saran dari penilai desain.

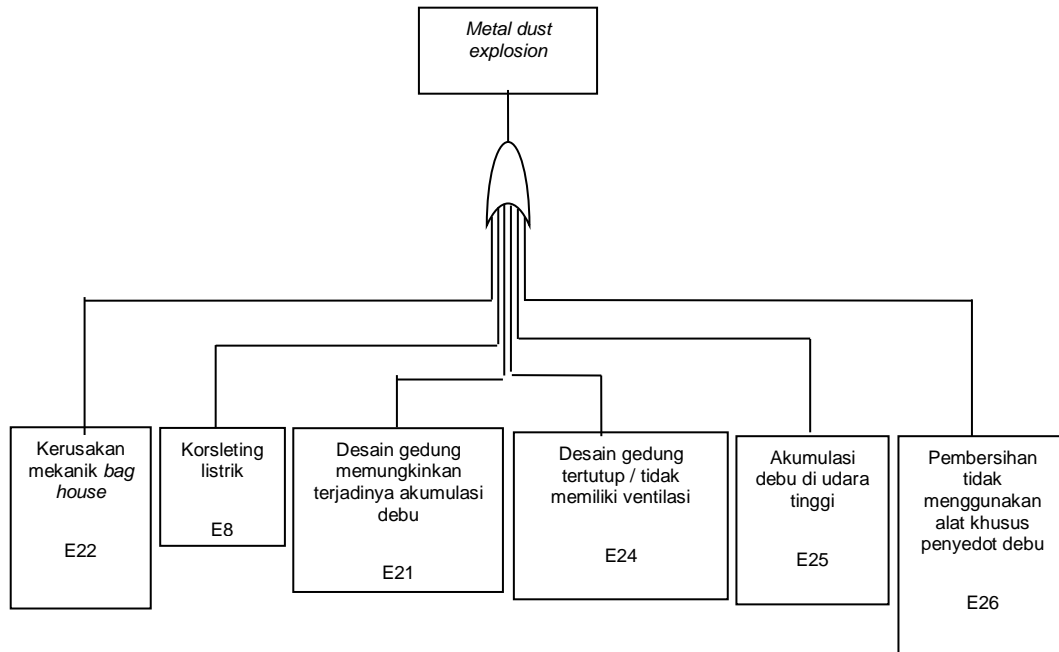
Rancangan produk ini hanya berhenti sampai menghasilkan rancangan teruji secara internal, tidak dibuat menjadi produk dan diuji lapangan/ penggunaannya.

Teknik analisis data pada *Research and Development* level 1 ini dilakukan pada saat melakukan penelitian untuk menemukan potensi dan masalah yang akan digunakan sebagai bahan untuk perancangan produk dan data pada penelitian ini disajikan dalam bentuk gambar, tabel, dan narasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

*Metal dust explosion* dapat terjadi dalam sistem pembuatan *billet* baja karena disebabkan oleh penyebab sekunder yang berupa: *intermediate event* kerusakan mekanik *bag house dust collector*, atau *intermediate event* korsleting listrik, atau *intermediate event* desain gedung yang memungkinkan terjadinya akumulasi debu, atau *intermediate event* desain gedung yang tertutup atau tidak memiliki ventilasi, atau *intermediate event* akumulasi debu di udara tinggi, dan atau *intermediate event* pembersihan debu yang tidak menggunakan alat penyedot debu khusus.

*Intermediate event* tersebut terjadi dikarenakan oleh beberapa *intermediate event* lanjutan atau *basic event* (penyebab dasar). Kerusakan *bag house dust collector* dapat terjadi diakibatkan oleh *intermediate event* berupa *maintenance* yang kurang baik atau pemakaian dalam jangka waktu lama, atau pula disebabkan



Gambar 1. Metal Dust Explosion Intermediate Event 1-6

oleh *basic event* kondisi mesin yang sudah tua. *Maintenance* yang kurang baik tersebut disebabkan oleh *basic event* kesalahan pemasangan, atau *basic event* kurangnya biaya untuk melakukan perawatan, atau *basic event* tidak adanya waktu untuk melakukan perawatan mesin karena proses produksi yang dilakukan selama 24 jam penuh. *Intermediate event* desain gedung yang memungkinkan terjadinya akumulasi debu dapat terjadi karena adanya *basic event* kurangnya biaya untuk melakukan pembuatan gedung sesuai standar pencegahan *dust explosion* atau *basic event* desain asli gedung yang tidak dapat terkait dengan peraturan setempat. *Intermediate event* tidak adanya ventilasi dapat terjadi karena *basic event* adanya larangan untuk pembuatan ventilasi atau *basic event* tidak adanya biaya untuk pembuatan ventilasi.

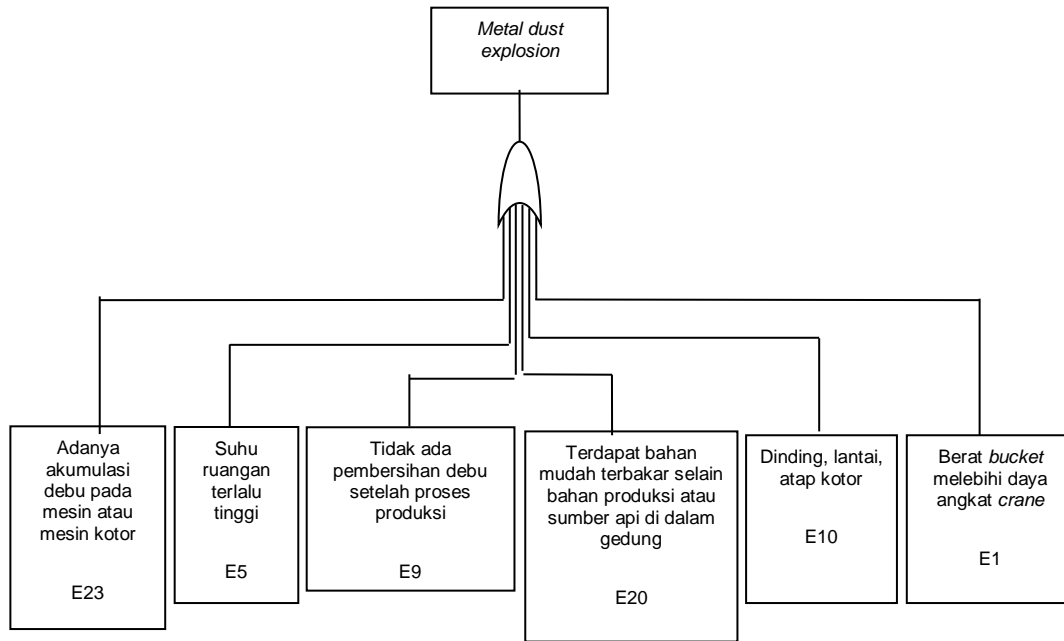
*Intermediate event* pembersihan tidak menggunakan alat khusus penyedot debu disebabkan oleh salah satu dari tiga penyebab primer berupa *basic event* kurangnya pengetahuan cara pembersihan yang tepat, atau kurangnya informasi cara pembersihan yang tepat, atau penggunaan alat penyedot debu dirasa mahal untuk dilakukan.

Selain itu, *metal dust explosion* dapat terjadi

oleh adanya *intermediate event* adanya akumulasi debu di mesin produksi, atau *intermediate event* suhu ruangan produksi dan tempat penyimpanan yang terlalu tinggi, atau *intermediate event* tidak adanya pembersihan debu yang dilakukan setelah proses produksi, atau *intermediate event* adanya bahan mudah terbakar selain bahan produksi maupun adanya sumber api di dalam gedung, atau *intermediate event* kondisi dinding, lantai, atap yang kotor, dan atau *intermediate event* berat *bucket* untuk mengangkut *scrap* melebihi daya angkat *crane*.

*Intermediate event* adanya akumulasi debu pada mesin dapat terjadi dikarenakan adanya *intermediate event* pembersihan mesin yang sulit dilakukan karena *basic event* mesin yang terlalu panjang dan *basic event* mesin terlalu sempit. *Intermediate event* suhu ruangan terlalu tinggi disebabkan oleh *intermediate event* tidak adanya pengendalian suhu ruangan dan atau *basic event* berupa suhu tinggi hasil proses produksi atau cuaca panas. Tidak adanya pengendalian suhu ruangan ini terjadi karena kesalahan dasar berupa tidak adanya biaya atau kurangnya ventilasi.

*Intermediate event* kondisi dinding, lantai, dan atap gedung produksi yang kotor terjadi dikarenakan 2 kejadian lanjutan berupa tidak



**Gambar 2.** Metal Dust Explosion Intermediate Event 7-12

dilakukannya pembersihan secara rutin, atau tidak dilakukannya pembersihan secara menyeluruh. Tidak dilakukannya pembersihan secara rutin ini disebabkan oleh *basic event* tidak adanya waktu untuk melakukan pembersihan, atau *intermediate event* tidak adanya program rutin pembersihan. Tidak adanya program tersebut dikarenakan penyebab primer berupa *basic event* tidak adanya kebijakan atau anggapan bahwa melakukan pembersihan secara rutin pada dinding, atap, lantai dirasa kurang kurang efektif. Sedangkan, kejadian lanjutan tidak dilakukannya pembersihan secara menyeluruh terjadi jika salah satu dari *intermediate event* tidak adanya program inspeksi kebersihan atau *basic event* gedung yang terlalu luas terjadi. Tidak adanya program inspeksi kebersihan sendiri terjadi disebabkan oleh *basic event* kurangnya sumber daya manusia untuk melakukan program, atau tidak adanya kebijakan yang mengatur tentang pelaksanaan program inspeksi kebersihan gedung.

Terjadinya kegagalan berat *bucket* yang melebihi daya angkat *crane* disebabkan oleh *intermediate event* kesalahan penimbangan, tidak adanya penimbangan *scrap*, dan atau penambahan berat yang sengaja dilakukan. Kesalahan penimbangan disebabkan oleh 2 *basic event* yaitu kurangnya akurasi timbangan atau

*human error*.

Tidak dilakukannya penimbangan *scrap* disebabkan oleh *basic event* tidak adanya alat penimbang, tidak ada pekerja pada bagian penimbangan, atau karena penimbangan dianggap terlalu memakan waktu. Sedangkan, kesengajaan penambahan jumlah *scrap* dalam *bucket* dihubungkan dengan gerbang INHIBIT karena hal ini terjadi akibat satu kejadian lanjutan berupa meningkatnya permintaan jumlah produksi yang diharuskan untuk memenuhi *conditioning event* mempercepat proses produksi.

*Intermediate event* tidak dilakukannya pembersihan debu setelah proses produksi disebabkan oleh *intermediate event* lemahnya program kebersihan di tempat kerja, atau *basic event* tidak efektif dilakukan pembersihan setelah proses produksi, atau *basic event* tidak dapat dilakukan karena produksi nonstop setiap hari, atau *basic event* tidak ada program. Kejadian yang terjadi selanjutnya lemahnya program kebersihan di tempat kerja sendiri disebabkan oleh *basic event* pembuat program yang kurang kompeten, atau tidak ada pengawas pelaksanaan program kerja.

Sedangkan, *intermediate event* adanya sumber api atau bahan mudah terbakar selain bahan produksi di dalam gedung dapat terjadi

karena adanya salah satu penyebab berupa *intermediate event* pekerja secara sengaja membawa sumber api atau bahan mudah terbakar ke dalam gedung atau kurangnya pengawasan kegiatan berpotensi api. *Intermediate event* pekerja yang secara sengaja membawa sumber api atau bahan mudah terbakar ke dalam gedung ini dapat terjadi karena *basic event* kurangnya pengawasan terhadap karyawan, atau *intermediate event* tidak adanya *safety sign* di sekitar gedung, atau *intermediate event* lemahnya peraturan perusahaan. Tidak adanya *safety sign* di sekitar gedung sendiri dapat disebabkan oleh salah satu dari penyebab primer *basic event* tidak adanya identifikasi bahaya, atau *safety sign* sudah tidak terpasang di tempat yang mudah terlihat, atau *safety sign* yang sudah dipasang hilang. Sedangkan, *intermediate event* lemahnya peraturan perusahaan dapat terjadi karena *basic event* peraturan yang tidak relevan, atau adanya toleransi/ sanksi ringan bagi pekerja yang melanggar, atau tidak tersedianya zona merokok. Kemudian untuk *intermediate event* kurangnya pengawasan kegiatan berpotensi api ini disebabkan oleh adanya salah satu penyebab dasar berupa *basic event* tidak adanya *hot work permit*, atau tidak adanya MSDS bahan mudah terbakar, dan atau tidak adanya *safety patrol*.

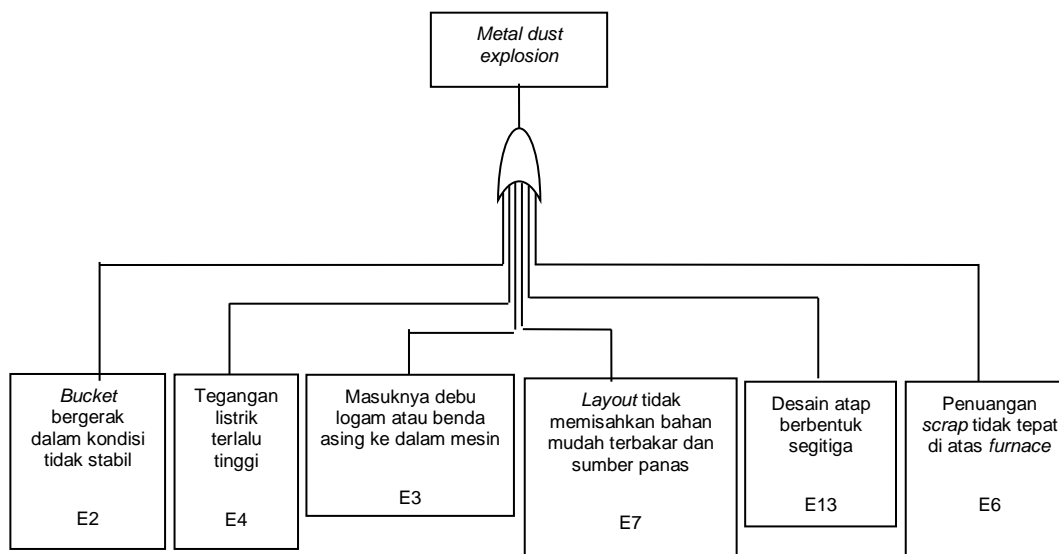
*Metal dust explosion* dapat terjadi disebabkan oleh *intermediate event bucket* yang bergerak dalam kondisi tidak stabil, atau *intermediate event* tegangan listrik yang terlalu tinggi, atau *intermediate event* masuknya debu logam ke dalam mesin yang dapat menyebabkan adanya akumulasi debu di permukaan mesin, atau *intermediate event* desain atap yang berbentuk segitiga yang dapat menyebabkan akumulasi debu di udara, atau *intermediate event layout* gedung yang tidak didesain untuk memisahkan bahan mudah terbakar dari sumber panas, dan atau *intermediate event* penuangan *scrap* tidak tepat di atas *furnace* dapat menyebabkan debu *scrap* berterbangan di udara.

*Intermediate event* tegangan listrik tinggi diakibatkan oleh *intermediate event* instalasi listrik tidak sesuai standar atau *intermediate event*

kegalatan pada trafo. Instalasi listrik tidak sesuai standar disebabkan oleh *basic event* berupa kesalahan saat penginstalan listrik atau tidak digunakannya standar instalasi listrik terbaru. Sedangkan, terjadinya kegalatan pada trafo dikarenakan *undeveloped event* kerusakan internal pada trafo atau *intermediate event* keadaan abnormal dari faktor eksternal trafo. Keabnormalan tersebut terjadi karena 2 *basic event* berupa petir atau suhu luar trafo yang sangat tinggi.

Masuknya debu logam pada mesin disebabkan oleh *intermediate event* tidak adanya tindakan isolasi pada mesin, atau banyaknya residu debu material logam, dan atau tidak adanya mesin penyedot debu pada setiap mesin. Tidak adanya tindakan isolasi pada mesin disebabkan oleh *basic event* kurangnya biaya, atau tidak dilakukannya identifikasi bahaya pada setiap mesin, dan atau pengadaan isolasi dianggap dapat memperlambat proses produksi. Tidak adanya sistem penyedot debu pada tiap mesin disebabkan oleh *basic event* ruangan sempit atau tindakan yang tidak efisien karena mengeluarkan uang lebih banyak. Sedangkan, penyebab banyaknya residu debu material logam adalah kesalahan dasar oleh hasil dari proses produksi itu sendiri atau kejadian lanjutan berupa masuknya debu dari bagian produksi lain. Masuknya debu dari bagian produksi lain ini dikarenakan *intermediate event* tidak adanya pembatas antar bagian produksi ditambah dengan adanya *basic event* faktor angin. Tidak adanya pembatas dikarenakan *basic event* desain asli dari gedung yang tidak dapat diubah atau tidak ada waktu dan biaya untuk melakukan pembangunan pembatas tiap bagian produksi.

*Bucket* bergerak dalam kondisi tidak stabil disebabkan oleh 2 *intermediate event* berupa kerusakan komponen *crane* atau *crane* yang bergerak terlalu cepat. Kerusakan komponen disebabkan oleh kejadian lanjutan berupa *maintenance* yang kurang baik atau *basic event* batas waktu pemakaian komponen. Penyebab *maintenance crane* yang kurang baik yaitu *intermediate event* keterlambatan penggantian komponen, dan atau *basic event* kurangnya biaya



Gambar 3. Metal Dust Explosion Intermediate Event 13-18

atau tidak adanya waktu untuk melakukan *maintenance*. Keterlambatan penggantian komponen sendiri disebabkan oleh *basic event* belum tersedianya komponen pengganti atau pemakaian komponen bekas.

Sedangkan, penyebab *intermediate event crane* yang berjalan dengan cepat adalah *basic event* pemenuhan permintaan produksi atau kejadian lanjutan berupa operator tidak mengikuti SOP. Ketidaksesuaian pekerjaan operator dengan SOP disebabkan oleh *intermediate event* kurangnya pengetahuan operator akan SOP atau tidak adanya SOP yang terpasang pada *crane*. Kurangnya pengetahuan tentang SOP disebabkan karena *basic event* tidak adanya pelatihan SOP pengoperasian *crane* atau daya ingat operator yang lemah untuk mengingat SOP. Kemudian untuk *intermediate event* tidak adanya SOP yang terpasang pada *crane* disebabkan oleh kesalahan dasar berupa kesengajaan untuk tidak dipasang atau sudah ada SOP namun belum dipasang di *crane*.

*Metal dust explosion* juga dapat terjadi karena adanya *intermediate event* pembersihan gedung dan mesin yang tidak dilakukan secara rutin, atau *intermediate event* lampu yang terbakar yang dapat menyebabkan percikan api, atau *intermediate event* adanya tumpukan debu di *palletizer* (tempat penyimpanan debu sementara di *dust collector*) yang tidak diambil seluruhnya, atau *intermediate event* tidak adanya tanda

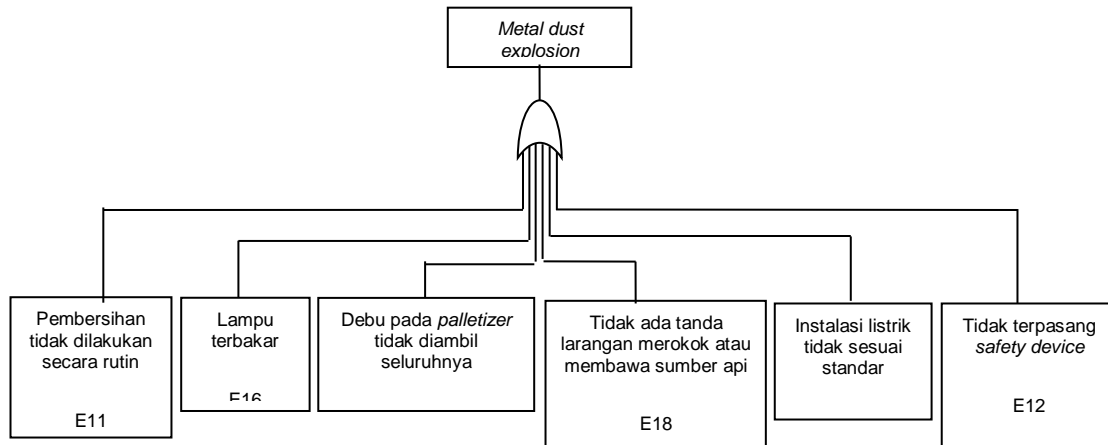
larangan merokok atau membawa sumber api ke dalam area produksi, atau *intermediate event* instalasi listrik yang tidak sesuai standar, dan atau *intermediate event* tidak terpasangnya *safety device* pada mesin atau gedung yang berpotensi tinggi terjadinya *dust explosion*.

*Intermediate event* tidak terpasangnya *safety device* pada *dust collector* disebabkan oleh 3 *basic event* yaitu tidak adanya identifikasi bahaya, atau tidak adanya biaya untuk pemasangan *safety device*, atau kurangnya pengetahuan akan pentingnya pengadaan *safety device* pada *dust collector*.

*Intermediate event* tidak adanya tanda larangan merokok atau membawa sumber api di sekitar gedung terjadi karena *intermediate event* tidak adanya program pembuatan *safety sign*, atau *basic event* berupa tanda larangan merokok belum terpasang, atau tanda larangan merokok dipasang di tempat yang sulit terlihat, atau tanda larangan merokok hilang. Sedangkan, penyebab *intermediate event* tidak adanya program pembuatan *safety sign* adalah kejadian dasar lemahnya kebijakan, atau pembuat program yang tidak berkompeten, atau kurangnya pengetahuan dan informasi akan pentingnya pembuatan *safety sign*.

*Intermediate event* pembersihan gedung tidak dilakukan secara rutin disebabkan oleh *intermediate event* tidak adanya program pembersihan rutin, atau tidak adanya waktu





Gambar 4. Metal Dust Explosion Intermediate Event 19-24

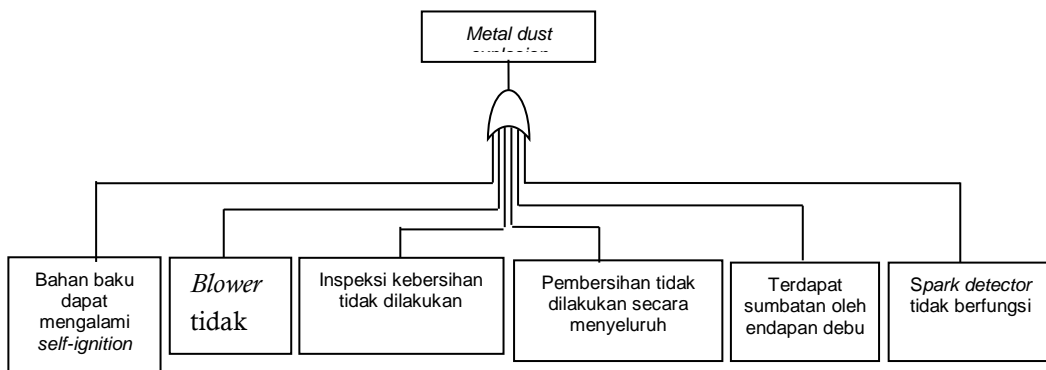
untuk melakukan pembersihan secara rutin. Tidak adanya program sendiri disebabkan oleh *basic event* lemahnya kebijakan tentang kebersihan gedung produksi, atau kurangnya pengetahuan tentang bahaya *dust explosion*, atau kurangnya informasi mengenai bahaya *dust explosion*.

Selain itu, *metal dust explosion* dapat terjadi dikarenakan *intermediate event* bahan baku berupa *sponge iron* yang dapat mengalami *self-ignition* yang disebabkan oleh *basic event* berupa terkena paparan panas atau terkena air hujan, atau *intermediate event blower* pada *dust collector* yang tidak berfungsi disebabkan oleh *basic event human error* atau kondisi mesin yang sudah tua, atau *intermediate event* inspeksi kebersihan yang tidak dilakukan, atau *intermediate event* pembersihan mesin atau gedung yang tidak dilakukan secara menyeluruh, atau *intermediate event* adanya sumbatan debu di *duct dust collector* yang dapat menyebabkan adanya akumulasi debu mudah terbakar, atau *intermediate event*

*spark detector* di *dust collector* tidak berfungsi karena tidak adanya *checklist* inspeksi *spark detector* atau tidak *human error*.

*Intermediate event* terdapatnya sumbatan oleh endapan debu disebabkan oleh *basic event* kebocoran *duct*, atau *intermediate event filter bag* yang rusak atau *blower* tidak beroperasi secara maksimal sehingga daya hisap debu lemah. *Intermediate event filter bag* rusak terjadi karena *basic event* berupa terlalu lamanya pemakaian *dust collector* atau usia *filter bag* yang sudah tua dan saatnya untuk penggantian, atau juga dapat disebabkan oleh *intermediate event* kurangnya perawatan yang terjadi karena kesalahan dasar berupa kurangnya sumber daya manusia untuk melakukan perawatan atau mengawasi jalannya program perawatan *filter bag dust collector*, atau karena kesalahan dasar tidak ada waktu untuk melakukan perawatan dikarenakan proses kerja nonstop.

Sedangkan, *intermediate event blower* yang tidak beroperasi secara maksimal disebabkan



Gambar 5. Metal Dust Explosion Intermediate Event 25-30

oleh *basic event* jumlah residu yang dihasilkan melebihi kapasitas hisap *blower*, atau *intermediate event* menurunnya kinerja *blower* oleh *basic event* usia yang sudah tua atau pengoperasian yang terlalu lama.

*Intermediate event* tidak dilakukannya inspeksi kebersihan secara rutin ini dapat disebabkan oleh *basic event* kurangnya tenaga kerja untuk melakukan pengawasan, atau *basic event* tidak efektif untuk dilakukan, dan atau *intermediate event* tidak adanya program yang disebabkan karena *basic event* kurangnya informasi tentang bahaya *dust explosion*, kurangnya pengetahuan tentang bahaya *dust explosion*, atau lemahnya kebijakan.

*Intermediate event* bahan baku yang disimpan dapat mengalami *self-ignition* karena terjadinya *intermediate event* kesalahan saat penyimpanan bahan, atau *basic event* terkena air hujan, atau *basic event* terpapar panas. Kejadian lanjutan kesalahan penyimpanan bahan dapat disebabkan oleh salah satu dari lima penyebab primer berupa *basic event human error*, atau tidak adanya label pada bahan mudah menyala, atau bahan mudah menyala tidak teridentifikasi, atau bahan mudah menyala tidak memiliki MSDS, atau kurangnya penghawaan/ventilasi pada gudang

*Intermediate event spark detector* tidak berfungsi disebabkan oleh terjadinya salah satu dari *intermediate event* kesalahan saat pemasangan atau *intermediate event spark detector* rusak. Kesalahan saat pemasangan *spark detector* terjadi disebabkan oleh penyebab primer berupa *human error* atau teknisi yang kurang kompeten. Sedangkan, *intermediate event spark detector* rusak disebabkan oleh *basic event* penggunaan barang bekas, atau *intermediate event* kurangnya pengecekan kondisi *spark detector* yang disebabkan oleh penyebab primer *basic event* berupa petugas tidak mendapatkan *training*, atau kelalaian petugas inspeksi, atau tidak adanya *checklist spark detector*, dan atau tidak adanya *safety patrol* untuk *spark detector*.

*Intermediate event* pembersihan gedung tidak dilakukan secara menyeluruh karena adanya salah satu penyebab berupa *intermediate event* tidak adanya inspeksi kebersihan, atau

*basic event* adanya bagian dari gedung yang sulit untuk dibersihkan seperti: atap dan dinding, atau *basic event* ukuran gedung yang terlalu besar, atau *basic event* memerlukan waktu lama untuk dilakukan, dan atau *basic event* tidak efektif untuk dilakukan pembersihan secara keseluruhan.

Sedangkan, *intermediate event* tidak adanya inspeksi kebersihan sendiri disebabkan oleh *basic event* tidak adanya pelatihan pada pekerja, atau *intermediate event* tidak adanya program inspeksi kebersihan yang disebabkan oleh salah satu dari tiga *basic event* berupa lemahnya kebijakan tentang kebersihan, kurangnya pengetahuan tentang bahaya *dust explosion*, atau kurangnya informasi tentang bahaya *dust explosion*.

Secara keseluruhan sistem pembuatan *billet* baja terdapat 30 penyebab sekunder atau *intermediate event* yang dapat menyebabkan *metal dust explosion*. Penyebab sekunder paling banyak terdapat pada sistem *housekeeping* kondisi gedung yaitu sebanyak 14,3% dari total 49 penyebab sekunder. Sedangkan, jenis penyebab sekunder paling banyak adalah suhu ruangan terlalu panas yaitu sebesar 8,1%, dilanjutkan dengan masuknya debu logam ke dalam mesin, adanya akumulasi debu pada mesin, dan kondisi atap, lantai, dan dinding gedung yang kotor masing-masing sebanyak 6,1%.

Penyebab sekunder tersebut terjadi disebabkan oleh penyebab primer yang menjadi penyebab dasar terjadinya *metal dust explosion*. Berdasarkan analisis *fault tree* secara keseluruhan sistem pembuatan baja diketahui terdapat 77 *basic event* yang menjadi penyebab dasar dari masing-masing penyebab sekunder. Penyebab dasar terbanyak yang menyebabkan *metal dust explosion* adalah kurangnya biaya dan kurangnya informasi yang masing-masing memiliki prosentase sebesar 6,5%.

*Minimal cut set* merupakan kombinasi terkecil dari komponen kesalahan yang apabila terjadi maka dapat menyebabkan terjadinya *top event* (Golberg, 1981). Berdasarkan penghitungan *minimal cut set* menggunakan aljabar Boolean didapatkan 75 *single minimal cut set* berupa: K1 (kurangnya akurasi timbangan), K2 (*human error*), K3 (tidak ada timbangan), K4

(tidak ada pekerja penimbangan/kurangnya SDM), K5 (Terlalu makan waktu/kurang efektif), K6 (Pemenuhan peningkatan jumlah produksi), K7 (Batas waktu pemakaian mesin), K8 (Kurangnya biaya/ terlalu mahal untuk dilakukan), K9 (Tidak ada waktu/ produksi nonstop), K10 (Belum tersedia komponen pengganti), K11 (Penggunaan komponen bekas), K12 (SOP sengaja tidak dipasang), K13 (SOP belum terpasang), K14 (Tidak ada induksi SOP), K15 (Operator tidak ingat SOP), K16 (Menghambat produksi), K17 (Tidak ada identifikasi bahaya), K18 (Hasil dari proses produksi), K19 (Terbawa angin), K20 (Desain asli gedung), K21 (Ruangan sempit), K22 (Tidak efisien), K23 (Tidak ada *safety patrol*), K24 (Tidak ada *confined space permit*), K25 (Tidak ada pengawasan), K26 (Kesalahan penginstalan), K27 (Tidak menggunakan standar terbaru), K28 (Petir), K29 (Suhu di luar tinggi/ cuaca panas), K30 (PMT tidak berfungsi), K31 (Kurangnya ventilasi/ penghawaan), K32 (Operator mengobrol saat bekerja), K33 (Operator kurang tidur), K34 (Kelainan mata operator), K35 (Mata operator lelah), K36 (Usia mesin sudah tua), K37 (Kurangnya pengetahuan), K38 (Kurangnya informasi), K39 (Menyingkat waktu pengisian bahan baku), K40 (Terbatasnya gedung), K41 (Pemilihan fungsi gedung salah), K42 (Tidak ada kebijakan), K43 (Sulit untuk dibersihkan), K44 (Kesalahan saat mendesain), K45 (Memiliki fungsi lain), K46 (Penjualan debu sedikit), K47 (Debu tidak sesuai dengan kualitas jual), K48 (Tempat penyimpanan debu penuh), K49 (Kurangnya kepedulian terhadap K3), K50 (Pekerja (pembuatan kebijakan atau teknisi) kurang kompeten), K51 (Terkena paparan panas langsung), K52 (Terkena air hujan), K53 (Tidak ada label), K54 (Tidak ada MSDS), K55 (Tanda larangan belum terpasang), K56 (Tanda larangan tidak terlihat), K57 (Tanda larangan hilang), K58 (Peraturan tidak relevan), K59 (Tidak ada zona merokok), K60 (Adanya toleransi sanksi ringan), K61 (Tidak ada *hot work permit*), K62 (Tidak ada program), K63 (Lemahnya kebijakan), K65 (Penggunaan dalam waktu lama), K67 (Rendahnya intensitas

pembersihan), K68 (Atap gedung berbentuk segitiga), K69 (Bahan baku menghasilkan banyak debu), K70 (Gedung terlalu besar), K71 (Kebocoran *duct*), K72 (Residu melebihi kapasitas hisap *blower*), K73 (pekerja bekerja dengan terburu-buru), K74 (Kelalaian petugas), K75 (Tidak ada *checklist* inspeksi), K76 (Hubungan pendek salah satu jaringan), dan K77 (Larangan pembuatan ventilasi), serta 3 *double minimal cut set* berupa: K19\*K8 (Debu mudah terbakar terbawa angin dan mahalnya biaya program pengendalian), K19\*K20 (Debu mudah terbakar terbawa angin dan desain asli gedung yang memungkinkan masuknya debu), dan K21\*K66 (terdapat ruangan-ruangan sempit dan gedung terlalu besar untuk dibersihkan).

*Minimal cut set* tersebut merupakan sebuah kombinasi dari beberapa kejadian yang dapat menjadi penyebab terjadinya *top event*, dimana *single minimal cut set* merupakan kesalahan tunggal yang apabila salah satu dari kejadian tersebut terjadi dapat menyebabkan *top event*, sedangkan *double minimal cut set* menampilkan kesalahan ganda yang apabila terjadi secara bersamaan akan menyebabkan terjadinya *top event* (Goldberg. 1981).

Berdasarkan dari penghitungan *minimal cut set* didapatkan beberapa penyebab dasar yang dibagi dalam beberapa *cluster* atau kelompok, yaitu sebagai berikut: 1) tidak adanya penimbangan atau kurangnya akurasi timbangan, 2) *human error*, 3) rendahnya sumber daya manusia, 4) pemenuhan peningkatan jumlah produksi, 5) lamanya waktu pemakaian mesin, 6) terbatasnya waktu dan biaya, 7) penggunaan komponen bekas, 8) ketiadaan *standard operating procedure*, 9) ketiadaan identifikasi bahaya, 10) faktor alam, 11) desain fasilitas atau gedung, 12) ketiadaan ijin kerja, 13) lemahnya kebijakan dan pembaruan standar, 14) kondisi mata operator, 15) usia mesin tua, 16) kurangnya pengetahuan, informasi, dan kepedulian tentang bahaya *dust explosion*, 17) ketiadaan label dan *material safety data sheet*, 18) ketiadaan *safety sign*, 19) ketiadaan zona merokok, 20) lemahnya program inspeksi dan program kebersihan, 21) rendahnya pelaksanaan pembersihan atau *housekeeping*, 22)

kebocoran *duct dust collector*, 23) adanya hubungan pendek, dan 24) banyaknya debu residu.

## PENUTUP

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas maka simpulan dalam penelitian adalah sebagai berikut: 1) terdapat 75 *single minimal cut set* dan 3 *double minimal cut set* sebagai kombinasi kejadian-kejadian dasar yang dapat menjadi penyebab terjadinya *metal dust explosion* di PT X, 2) penyebab dasar yang dapat menyebabkan terjadinya *metal dust explosion* dalam pembuatan *billet* baja ini adalah 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 *standard operating procedure*, ketiadaan identifikasi bahaya, faktor alam, desain fasilitas atau gedung, ketiadaan ijin kerja, lemahnya kebijakan dan pembaruan standar, kondisi mata operator, usia mesin tua, kurangnya pengetahuan, informasi, dan kepedulian tentang bahaya *dust explosion*, ketiadaan label dan *material safety data sheet*, ketiadaan *safety sign*, ketiadaan zona merokok, lemahnya program inspeksi dan program kebersihan, rendahnya pelaksanaan pembersihan atau *housekeeping*, kebocoran *duct dust collector*, dan adanya hubungan pendek, banyaknya debu residu.

Penelitian ini merupakan penelitian R&D Level 1, sehingga dalam penelitian ini tidak membuat produk jadi maupun dilakukan uji coba produk pada perusahaan terkait. Maka dari itu, 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

- CSB. 2008. *Investigation Report: Combustible Dust Hazard Study*. Washington: US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- Goldberg, F. F., Vesely, W. E., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. 1981. *Fault Tree Handbook*. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Lemkowitz, S. M., & Pasman, H. J. 2014. A Review of the Fire and Explosion Hazards of Particulates. *KONA Powder and Particle Journal*. 31:53-81.
- Mittal, M. 2013. Explosion Hazard and Safety in Industries Handling Grain Products. *Journal of Engineering Research and Studies*. 4(3): 1-11.
- Pitasari, G. P., Wahyuning, C. R., & Desrianty, A. 2014. Analisis Kecelakaan Kerja untuk Meminimalisasi Potensi Bahaya Menggunakan Metode Hazard and Operability dan Fault Tree Analysis (Studi Kasus di PT X). *Reka Integra*. 2(2): 167-179.
- Sharma P., & Singh, A. 2015. Overview of Fault Tree Analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 4(3): 337-340.
- Sulaiman, W. Z. W., & Kasmani, R. M. 2011. An Overview of Explosion Severity on Dust Explosion. *Jurnal Teknologi*. 56(1).
- Wulandari Y.R. 2017. Penerapan HIRARC sebagai Upaya Pencehagan Kecelakaan Kerja pada Proses Produksi Garmen. *HIGEIA Journal of Public Health Research and Development*. 1(4): 86-96.
- Vijayaraghavan, G. 2011. Dust Explosion A Major Industrial Hazard. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 2(4): 83-87.
- 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.