



# BAHAYA DEBU

RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI



MUHAMAD DAWAMAN  
KETUT IMA ISMARA  
MUJIYONO

Sanksi Pelanggaran Pasal 113  
Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp.4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

# **BAHAYA DEBU**

**RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI**

**Muhamad Dawaman**

**Ketut Ima Ismara**

**Mujiyono**



**GREENBOOK**

Specialist International Standard Book Publishing

# BAHAYA DEBU

## RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI

**Penulis:**

Muhamad Dawaman

Ketut Ima Ismara

Mujiyono

**Desain Cover:**

Nur Muhamad Safii

**Tata Letak:**

Komarudin

**Editor:**

Komarudin

**ISBN:**

978-634-7542-29-8

Hak Cipta 2026, Pada penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2026

by Penerbit Greenbook Publishing Indonesia

All Right Reserved

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Greenbook Publishing Indonesia

Jl. Sultan Ageng Tirtayasa No.12, Kedungjaya, Kec.

Kedawung, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat 45611

## EKAPUR SIRIH

Keselamatan kerja merupakan amanah yang tidak hanya bersifat profesional, tetapi juga bernilai ibadah. Dalam Islam, setiap bentuk bahaya yang dapat diprediksi dan dicegah—termasuk bahaya debu mudah terbakar (*combustible dust*)—wajib dikelola dengan penuh tanggung jawab, karena menyangkut perlindungan jiwa dan kemaslahatan bersama. Allah SWT berfirman: **“Dan janganlah kamu menjatuhkan dirimu sendiri ke dalam kebinasaan”** (QS. Al-Baqarah [2]: 195), serta mengingatkan pentingnya ilmu dalam setiap tindakan: **“Apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui?”** (QS. Az-Zumar [39]: 9).

Rasulullah ﷺ menegaskan prinsip pencegahan bahaya melalui sabdanya: **“Tidak boleh menimbulkan bahaya dan tidak boleh membalas bahaya dengan bahaya”** (HR. Ibnu Majah), dan menekankan amanah serta profesionalisme dalam bekerja: **“Setiap kalian adalah pemimpin, dan setiap kalian akan dimintai pertanggungjawaban atas kepemimpinannya”** (HR. Bukhari dan Muslim), serta **“Sesungguhnya Allah mencintai apabila seseorang di antara kalian melakukan suatu pekerjaan, ia melakukannya dengan itqan (profesional dan sungguh-sungguh)”** (HR. Thabrani). Dengan landasan ini, buku

*Bahaya Debu Combustible* diharapkan menjadi sarana ilmu dan pengingat bahwa pencegahan kebakaran dan ledakan bukan hanya kewajiban teknis, melainkan bagian dari amanah moral dan tanggung jawab spiritual.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku **“BAHAYA DEBU RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI”** ini dapat disusun dan diselesaikan. Buku ini lahir dari kebutuhan nyata akan tersedianya referensi teknis yang komprehensif, mutakhir, dan kontekstual mengenai bahaya debu mudah terbakar (*combustible dust*), khususnya dalam lingkungan industri Indonesia yang terus berkembang dan semakin kompleks.

Perkembangan pesat sektor manufaktur, industri pangan, energi, pupuk, kimia, serta pengolahan biomassa di Indonesia membawa konsekuensi berupa meningkatnya potensi bahaya kebakaran dan ledakan debu. Dalam banyak fasilitas industri, debu hasil proses produksi masih sering dipersepsikan semata-mata sebagai persoalan kebersihan atau housekeeping, padahal pada kenyataannya debu tersebut merupakan bahan bakar ledakan dengan karakteristik bahaya yang signifikan. Berbagai kecelakaan industri di tingkat global telah menunjukkan bahwa kegagalan dalam mengenali, menilai, dan mengendalikan bahaya debu combustible kerap berujung pada kerugian besar, baik terhadap keselamatan manusia, kerusakan aset, gangguan operasional, maupun keberlanjutan usaha.

Buku ini disusun dengan mengintegrasikan pendekatan ilmiah, pembelajaran dari insiden nyata, serta rujukan terhadap standar dan praktik terbaik internasional, antara lain NFPA 660, NFPA 652, ISO/IEC 80079, ATEX Directive, dan pedoman terkait lainnya. Seluruh pembahasan dikaitkan secara sistematis dengan kerangka regulasi serta praktik Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Indonesia, sehingga materi tidak hanya bersifat normatif, tetapi juga aplikatif dan relevan untuk diterapkan di lapangan. Penyajian materi dilakukan secara terstruktur, mulai dari konsep dasar bahaya debu, mekanisme kebakaran dan ledakan, metode analisis dan penilaian risiko, teknologi pencegahan dan mitigasi, hingga peran kepemimpinan, manajemen, dan budaya keselamatan dalam membangun sistem pengendalian yang berkelanjutan.

Penulis berharap buku ini dapat menjadi rujukan bagi praktisi K3, engineer, manajemen industri, akademisi, mahasiswa, regulator, serta seluruh pemangku kepentingan yang memiliki tanggung jawab dalam pengendalian risiko kebakaran dan ledakan debu. Lebih dari sekadar sumber pengetahuan, buku ini diharapkan mampu mendorong perubahan paradigma dari pendekatan yang reaktif dan berbasis insiden menuju manajemen bahaya debu yang proaktif, berbasis risiko, dan selaras dengan standar internasional.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi peningkatan keselamatan industri di Indonesia serta menjadi bagian dari upaya kolektif dalam mencegah kecelakaan yang sejatinya dapat dihindari, melalui penerapan pengendalian bahaya debu yang terencana, terukur, dan berkelanjutan.

Indonesia, 2025

**Muhamad Dawaman**

**Ketut Ima Ismara**

**Mujiyono**

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kontribusi dalam penyusunan buku **“BAHAYA DEBU RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI”** ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tulus penulis sampaikan kepada **keluarga tercinta**, yang senantiasa memberikan doa, pengertian, serta dukungan moral yang tidak ternilai selama proses penulisan dan penyelesaian buku ini. Dukungan keluarga menjadi sumber kekuatan utama dalam menjaga konsistensi, ketekunan, dan semangat penulis.

Penulis juga menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang mendalam kepada Promotor Prof. Dr. Ir. Ima Ismara, M.Pd., M.Kes, IPU, ASEAN. Eng dan Co-Promotor Prof. Dr. Ir. Mujiyono, M.T. IPU., Asean.Eng., atas arahan ilmiah, masukan akademik, serta bimbingan yang konstruktif dan berkelanjutan. Peran beliau-beliau sangat berarti dalam memperkaya sudut pandang keilmuan, menjaga kedalaman analisis, serta memastikan kualitas substansi buku ini.

Apresiasi yang tinggi penulis sampaikan kepada Pengurus Inti **Masyarakat Profesi Keselamatan Kebakaran**

**Indonesia (MPK2I)** atas dukungan profesional, ruang diskusi, pertukaran pengetahuan, serta kontribusinya dalam pengembangan wawasan dan praktik keselamatan kebakaran di Indonesia. Keberadaan MPK2I menjadi elemen penting dalam memperkuat relevansi buku ini terhadap kebutuhan nyata di lapangan.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, praktik keselamatan kebakaran, serta peningkatan budaya keselamatan industri di Indonesia.

## Sambutan

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Salam Sejahtera bagi kita semua,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, buku berjudul **"BAHAYA DEBU RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI"** ini dapat disusun dan kini hadir di tengah-tengah pembaca sekalian. Merupakan sebuah proses yang panjang untuk menyusun buku ini, sebagai bentuk komitmen kami yang concern akan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).

Dunia industri terus berkembang pesat, seiring kemajuan teknologi yang berpotensi membawa serta risiko-risiko baru yang sering kali tidak kasatmata. Salah satu tantangan besar yang kerap diabaikan adalah potensi bahaya dari debu yang mudah terbakar (combustible dust). Banyak yang tidak menyadari bahwa material yang tampak remeh—seperti serbuk kayu, gula, tepung, hingga partikel logam—dapat berubah menjadi bahan bakar ledakan yang dahsyat dalam kondisi tertentu.

Buku ini disusun sebagai respons atas kebutuhan mendesak akan literatur keselamatan kerja yang komprehensif di Indonesia. Di dalamnya, kami membedah secara mendalam seperti:

- Karakteristik Bahaya: Bagaimana debu bereaksi sebagai bahan bakar dalam ledakan.
- Analisis Risiko: Memahami berbagai sektor industri yang memiliki kerentanan tinggi terhadap insiden ini.
- Strategi Pencegahan: Langkah-langkah teknis untuk memitigasi potensi kebakaran dan ledakan.
- Pengendalian Berkelanjutan: Implementasi standar keselamatan yang mampu melindungi aset paling berharga dalam industri, yakni nyawa manusia.

Harapan saya, buku ini tidak hanya menjadi referensi akademis bagi para praktisi K3, akademisi, dan pemilik usaha, tetapi juga menjadi panduan praktis untuk menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan sehat. Kesadaran akan bahaya adalah langkah pertama menuju pencegahan; dan pencegahan adalah investasi terbaik bagi keberlangsungan industri.

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung proses penyusunan buku ini. Semoga karya ini bermanfaat dan menjadi sumbangsih nyata bagi kemajuan budaya K3 di Indonesia.

Salam Keselamatan dan Kesehatan Kerja,

Prof. Dr. Ir. Ketut Ima Ismara M.Pd., M.Kes., IPU, ASEAN.  
Eng.

## **Sambutan Buku Pak Dawam**

Pertama saya menyampaikan ucapan selamat kepada Dawam atas keberhasilannya menulis dan menerbitkan buku **BAHAYA DEBU RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI.**

Buku yang menurut saya sangat langka tema yang dipilih beliau karena memerlukan keahlian khusus dalam bidang kebakaran dan peledakan lebih spesifik tentang bahaya Debu

Kita sering menganggap debu sebagai hal sepele, seperti bahaya pernafasan atau dapat menimbulkan sampah dan pengotoran lingkungan. Tetapi tidak banyak yang menyadari bahwa debu jenis tertentu juga memiliki sifat berbahaya karena bisa memicu kebakaran dan peladakan

Dalam buku ini Pak Dawam membahasnya secara detail dan teknis, apa bahaya debu, jenis-jenis debu yang ditimbulkan dari proses produksi, dan proses terjadinya ledakan dan strategi penangulangannya. Dalam bagian I beliau menjelaskan dengan rinci apa yang disebut Debu, dan kemudian dalam Bagian II di bawah aspek risikonya. Kemudian di Bagian III membahas berbagai studi kasus, bagian IV tentang standar dan regulasi. Artinya penulisan buku ini sangat lengkap sistimatis dan rinci

Untuk itu perlu dan bermanfaat untuk di baca dan diterapkan oleh teman2 K3 khususnya yang bekerja dilingkungan industry dengan potensi bahaya debu berbahaya

Selamat atas penerbotan buku semoga bermanfaat

Soehatman Ramli

## **Sambutan Buku Pak Muhamad Dawaman**

Buku terkait Process Safety yang ditulis oleh Muhamad Dawaman ini dapat digunakan sebagai acuan praktis dan yang sangat penting untuk meningkatkan kesadaran dan upaya pencegahan terjadinya insiden besar/katastropik berupa bahaya kebakaran atau ledakan yang disebabkan oleh debu hasil proses produksi di industri.

Di sektor-sektor industri farmasi, pengolahan makanan, pertanian, dan industri lainnya yang dalam operasionalnya menghasilkan debu mudah terbakar, memerlukan upaya pencegahan dan penanganan terhadap resiko ledakan debu untuk menjaga keselamatan manusia, infrastruktur dan lingkungan yang aman.

Didalam buku ini sudah dibahas cukup detail mengenai sumber penyalan, Manajemen Resiko termasuk Identifikasi dan pengendalian resiko, dan penanganan Keadaan Darurat.

Untuk itu kita menyambut gembira dan mengucapkan selamat atas diterbitkannya buku “Bahaya Debu” : Risiko dan Pencegahan Ledakan Industri terkait, dan semoga para praktisi HSE di lapangan dan para pengawas lini di bidang Operasi, Pemeliharaan, dan Konstruksi merasakan manfaatnya setelah menerapkan metode dan teknik

penerapan pengendalian bahaya debu yang disajikan dalam buku ini.

Jakarta, 3 Maret 2026

Ir. Ismet Somad MSc.Eng

Board of Executive WSO Indonesia dan

Pengarang Buku Teknik Efektif Dalam Membudayakan K3

## SAMBUTAN

### Ulasan Manfaat dan Pentingnya Buku “Bahaya Debu”

Puji dan syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku “Bahaya Debu” ini dapat hadir sebagai kontribusi nyata dalam meningkatkan pemahaman dan kesadaran terhadap risiko debu industri yang sering kali tersembunyi namun berpotensi sangat fatal.

Selama ini, debu kerap dipandang sebagai persoalan kebersihan semata. Padahal dalam konteks industri—baik pertambangan, manufaktur, farmasi, pengolahan pangan, hingga energi—debu dapat menjadi sumber bahaya serius, mulai dari gangguan kesehatan pernapasan, pencemaran lingkungan kerja, hingga risiko kebakaran dan ledakan yang dapat mengakibatkan korban jiwa serta kerugian material yang besar. Sejarah berbagai insiden industri di dunia telah membuktikan bahwa debu yang mudah terbakar (combustible dust) dapat menjadi pemicu bencana besar apabila tidak dikelola dengan sistematis dan berbasis standar keselamatan yang memadai.

Buku ini memiliki manfaat strategis karena menyajikan pembahasan yang komprehensif, sistematis, dan aplikatif mengenai karakteristik bahaya debu, mekanisme terjadinya ledakan debu, persyaratan teknis pencegahan, hingga

pendekatan mitigasi berbasis filosofi process safety modern. Pembaca tidak hanya diberikan pemahaman teoritis, tetapi juga diarahkan pada pendekatan praktis seperti identifikasi risiko, pengendalian sumber penyalan, manajemen housekeeping, sistem ventilasi, hingga penerapan teknologi proteksi seperti explosion venting, suppression, dan isolation.

Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi penting bagi praktisi K3, engineer, manajer operasional, auditor, regulator, akademisi, serta seluruh pihak yang memiliki tanggung jawab dalam pengelolaan risiko industri. Semoga kehadiran buku ini dapat meningkatkan kewaspadaan, memperkuat sistem pengendalian, serta mendorong terciptanya lingkungan kerja yang lebih aman, sehat, dan produktif.

Harapan kami, buku “Bahaya Debu” ini tidak hanya dibaca, tetapi dipahami, diterapkan, dan dijadikan pedoman dalam setiap aktivitas yang berpotensi menimbulkan risiko debu.

Salam Keselamatan dan Kesehatan Kerja,

Prof. Dr. Ir. Mujiyono, M.T., IPU., ASEAN. Eng.

## DAFTAR ISI

|                                                         |       |
|---------------------------------------------------------|-------|
| KATA PENGANTAR .....                                    | i     |
| SEKAPUR SIRIH .....                                     | i     |
| UCAPAN TERIMA KASIH .....                               | vi    |
| GLOSARIUM ISTILAH BAHAYA DEBU                           |       |
| COMBUSTIBLE (A-Z).....                                  | xxxix |
| BAGIAN I PENDAHULUAN DAN KONSEP DASAR .....             | 1     |
| BAB 1 PENDAHULUAN: MENGAPA DEBU BISA                    |       |
| MELEDAK?.....                                           | 1     |
| 1.1. Kasus Nyata Ledakan Debu: Pelajaran dari Berbagai  |       |
| Sektor Industri .....                                   | 3     |
| a) Industri Gula: Manis di Mulut, Pahit di Bencana..... | 3     |
| b) Industri : Kombinasi Bahan Organik yang              |       |
| Berbahaya .....                                         | 7     |
| c) Industri Pupuk: Ancaman dari Senyawa Kimia .....     | 8     |
| d) Industri Tepung dan Serbuk Lainnya: Pelajaran        |       |
| Sejarah yang Terus Berulang .....                       | 10    |
| 1.2. Sifat Kombustibel Debu Organik: Dari Bahan Aman    |       |
| Menjadi Bahan Berbahaya .....                           | 16    |
| 1.3. Pentagon Ledakan Debu: Lima Syarat Menuju          |       |
| Bencana.....                                            | 18    |
| 1.4. Perbandingan dengan Jenis Debu Lain: Kayu,         |       |
| Batubara, dan Logam.....                                | 25    |
| BAB 2 KARAKTERISTIK LEDAKAN DEBU .....                  | 30    |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Pendahuluan .....                                                          | 31 |
| 2.2. Parameter Kunci Ledakan Debu .....                                         | 31 |
| 2.3. Tabel Data Utama dan Interpretasinya .....                                 | 33 |
| 2.4. Faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Ledakan...                          | 44 |
| BAB 3 SUMBER PENYALAAAN DAN MEKANISME                                           |    |
| AWAL LEDAKAN .....                                                              | 51 |
| 3.1. Pendahuluan .....                                                          | 52 |
| 3.2. Sumber Penyalaan Umum di Pabrik .....                                      | 52 |
| 3.2.1. Percikan Listrik dan Listrik Statis .....                                | 53 |
| 3.2.2. Permukaan Panas (Hot Surfaces) .....                                     | 56 |
| 3.2.3. Api Terbuka dan Pekerjaan Panas (Hot Work)..                             | 58 |
| 3.2.4. Gesekan Mekanik dan Percikan Gesekan<br>(Friction Sparks) .....          | 60 |
| 3.3. Mekanisme Penyalaan Lapisan Debu yang<br>Terdeposit.....                   | 61 |
| 3.4. Ledakan Sekunder (Secondary Explosion):<br>Peningkatan Skala Bencana ..... | 64 |
| 3.5. Kesimpulan .....                                                           | 66 |
| BAGIAN 2: PENILAIAN DAN MANAJEMEN RISIKO .....                                  | 68 |
| BAB 4. IDENTIFIKASI BAHAYA DAN PENILAIAN                                        |    |
| RISIKO .....                                                                    | 68 |
| 4.1. Pendahuluan .....                                                          | 69 |
| 4.2. Metode HAZOP untuk Atmosfer Debu<br>Combustible .....                      | 69 |
| 4.2.1. Prinsip dan Adaptasi HAZOP untuk Debu .....                              | 70 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2. Prosedur dan Manfaat Penerapan .....                                         | 71 |
| 4.3. Klasifikasi Area Berbahaya (Hazardous Area<br>Classification) untuk Debu ..... | 72 |
| 4.3.1. Dasar Klasifikasi: Zona 20, 21, dan 22 .....                                 | 73 |
| 4.3.2. Tantangan dan Kesalahan Umum .....                                           | 75 |
| 4.4. Studi Kasus: Penilaian Risiko Terintegrasi untuk<br>Unit Kritis.....           | 76 |
| 4.4.1. Sistem Penggilingan (Grinding) dengan<br>Hammer Mill.....                    | 77 |
| 4.4.2. Sistem Pengempaan (Pelletizing) dan<br>Pendinginan .....                     | 78 |
| 4.4.3. Sistem Pengumpul Debu (Dust Collector) – Titik<br>Risiko Tertinggi .....     | 79 |
| 4.5. Pendekatan Probabilistik untuk Debu Bereaktivitas<br>Rendah.....               | 81 |
| 4.5.1. Tantangan dalam Penilaian Risiko<br>Konvensional .....                       | 81 |
| 4.5.2. Pemodelan Probabilistik.....                                                 | 83 |
| 4.6. Kesimpulan .....                                                               | 87 |
| BAB 5 PENCEGAHAN LEDAKAN DEBU .....                                                 | 91 |
| 5.1. Pendahuluan .....                                                              | 92 |
| 5.2. Prinsip Dasar Pencegahan: Memecah Dust Explosion<br>Pentagon.....              | 92 |
| 5.3. Pengendalian Debu: Housekeeping yang Ketat dan<br>Terjadwal.....               | 94 |

|                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.1. Prinsip dan Standar Housekeeping .....                                                 | 100        |
| 5.3.2. Area Prioritas dan Metode Pembersihan .....                                            | 103        |
| 5.4. Pengendalian Sumber Penyalaan: Program yang<br>Komprehensif .....                        | 106        |
| 5.4.1. Pengendalian Bahaya Listrik dan Listrik<br>Statis .....                                | 106        |
| 5.4.2. Pengendalian Permukaan Panas dan Pekerjaan<br>Panas ( <i>Hot Work</i> ).....           | 110        |
| 5.4.3. Pengendalian Gesekan Mekanis.....                                                      | 113        |
| 5.5. Inerting: Mengurangi Kadar Oksigen di Bawah<br>Limiting Oxygen Concentration (LOC) ..... | 116        |
| 5.5.1. Prinsip dan Aplikasi .....                                                             | 116        |
| 5.5.2. Studi Kasus dan Efektivitas .....                                                      | 121        |
| 5.6. Kesimpulan .....                                                                         | 125        |
| <b>BAB 6 MITIGASI KONSEKUENSI LEDAKAN.....</b>                                                | <b>131</b> |
| 6.1. Pendahuluan dan Filosofi Mitigasi .....                                                  | 132        |
| 6.2. Peledakan Terarah (Explosion Venting) .....                                              | 133        |
| 6.2.1. Prinsip Desain dan Komponen.....                                                       | 134        |
| 6.2.2. Flameless Venting: Solusi untuk Ruang<br>Terbatas.....                                 | 137        |
| 6.2.3. Batasan Venting .....                                                                  | 138        |
| 6.3. Pemadaman Ledakan (Explosion Suppression) .....                                          | 141        |
| 6.3.1. Prinsip Kerja dan Komponen (Nanodetik vs<br>Milidetik) .....                           | 142        |
| 6.3.2. Keuntungan dan Aplikasi .....                                                          | 145        |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.3. Tantangan:.....                                                   | 147 |
| 6.4. Isolasi Ledakan (Explosion Isolation).....                          | 150 |
| 6.4.1. Jenis Sistem Isolasi:.....                                        | 150 |
| 6.4.2. Tantangan dan Pentingnya Desain yang<br>Tepat.....                | 150 |
| 6.5. Pemilihan dan Integrasi Sistem Mitigasi.....                        | 157 |
| 6.6. Kesimpulan .....                                                    | 168 |
| Bab 7 Titik Kritis dalam Proses Produksi .....                           | 174 |
| 7.1. Pendahuluan .....                                                   | 175 |
| 7.2. Sistem Pengumpul Debu (Dust Collector): Titik Paling<br>Kritis..... | 177 |
| 7.2.1. Mengapa Dust Collector Sangat Rentan?.....                        | 178 |
| 7.2.2. Analisis Risiko Mendalam Berdasarkan Jenis<br>Collector .....     | 178 |
| 7.2.3. Strategi Mitigasi Terpadu.....                                    | 187 |
| 7.3. Area Penggilingan dan Penimbunan.....                               | 190 |
| 7.3.1. Sumber Bahaya Utama .....                                         | 192 |
| 7.3.2. Studi Kasus & Mitigasi: .....                                     | 194 |
| 7.4. Sistem Konveyor.....                                                | 199 |
| 7.4.1. Analisis Bahaya Spesifik.....                                     | 200 |
| 7.4.2. Pendekatan Mitigasi: .....                                        | 203 |
| 7.5. Silo Penyimpanan.....                                               | 205 |
| 7.5.1. Karakteristik Risiko.....                                         | 208 |
| 7.5.2. Prinsip Proteksi dan Studi Kasus .....                            | 210 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.6 Pembuatan Dokumen Proteksi Ledakan (Explosion Protection Document).....                      | 213 |
| 7.6.1 Tujuan dan Fungsi Explosion Protection Document .....                                      | 214 |
| 7.6.2 Peran Data Uji Ledakan Debu dalam EPD .....                                                | 219 |
| 7.6.2 Lingkup dan Batasan Explosion Protection Document .....                                    | 220 |
| 7.6.3 Hubungan Explosion Protection Document dengan Regulasi dan Audit Keselamatan.....          | 222 |
| 7.6.4 Integrasi Explosion Protection Document dengan Dust Hazard Analysis.....                   | 224 |
| 7.6.5 Isi Minimum Explosion Protection Document..                                                | 228 |
| 7.6.6 Peran Explosion Protection Document dalam Pencegahan Insiden Nyata.....                    | 233 |
| BAGIAN 3: STUDI KASUS DAN APLIKASI INDUSTRI ..                                                   | 237 |
| Bab 8 KASUS LEDAKAN PADA BEBERAPA INDUSTRI                                                       | 237 |
| 8.1. Pendahuluan .....                                                                           | 238 |
| 8.2. Studi Kasus Investigasi Ledakan Debu .....                                                  | 241 |
| 8.3. Metodologi Investigasi Akar Penyebab .....                                                  | 243 |
| 8.4. Studi Kasus 1: Ledakan di Pabrik Pengolahan Makanan.....                                    | 249 |
| 8.5. Studi Kasus 2: Ledakan Debu Logam di Fasilitas Manufaktur.. .....                           | 253 |
| 8.6. Studi Kasus 3: Ledakan Berantai (Secondary Explosions) di Pabrik Kayu atau Biomassa.. ..... | 256 |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bab 9 Kerangka Manajemen Risiko dan Standar Terkait                                          |     |
| Bahaya Ledakan Debu.....                                                                     | 259 |
| 9.1 Pendahuluan .....                                                                        | 260 |
| 9.2 Konsep Dasar Manajemen Risiko Ledakan Debu.....                                          | 260 |
| 9.3 Kerangka Umum Manajemen Risiko (ISO 31000 dan<br>Process Safety Management) .....        | 266 |
| 9.3.1 Kerangka Manajemen Risiko ISO 31000 .....                                              | 266 |
| 9.3.2 Process Safety Management dalam Pengelolaan<br>Bahaya Debu .....                       | 268 |
| 9.3.3 Integrasi ISO 31000 dan PSM.....                                                       | 269 |
| 9.3.4 Peran Kerangka Manajemen Risiko dalam Siklus<br>Hidup Fasilitas.....                   | 270 |
| 9.3.5 Keterkaitan dengan Fire Safety Engineering dan<br>Bab Selanjutnya.....                 | 270 |
| 9.4 Identifikasi dan Analisis Risiko Ledakan Debu .....                                      | 271 |
| 9.4.1 Identifikasi Bahaya Ledakan Debu .....                                                 | 272 |
| 9.4.2 Analisis Karakteristik Eksplosibilitas Debu .....                                      | 273 |
| 9.4.3 Analisis Skenario dan Eskalasi Ledakan.....                                            | 274 |
| 9.4.4 Evaluasi Risiko dan Penentuan Tingkat Risiko                                           | 274 |
| 9.4.5 Integrasi Identifikasi dan Analisis Risiko dengan<br>PSM dan Pembelajaran Insiden..... | 275 |
| 9.5 Hierarchy of Risk Treatment (HoRT) dan Inherently<br>Safer Design .....                  | 276 |
| 9.5.1 Inherently Safer Design sebagai Pengendalian<br>Tingkat Tertinggi.....                 | 277 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.5.2 Engineering Controls dalam Pengelolaan<br>Ledakan Debu .....     | 278 |
| 9.5.3 Administrative Controls dan Keterbatasannya                      | 279 |
| 9.5.4 Personal Protective Equipment sebagai Lapisan<br>Terakhir.....   | 279 |
| 9.5.5 Integrasi HoRT dengan PSM dan Fire Safety<br>Engineering .....   | 280 |
| 9.6 Standar dan Regulasi Terkait Bahaya Ledakan<br>Debu .....          | 281 |
| 9.6.1 Standar NFPA untuk Combustible Dust .....                        | 282 |
| 9.6.2 ATEX dan Pengendalian Atmosfer Eksplosif<br>Debu .....           | 283 |
| 9.6.3 Standar ISO dan IEC dalam Perspektif Global .                    | 285 |
| 9.6.4 ANSI/ ASSP Z590.3 dan Inherently Safer<br>Design .....           | 285 |
| 9.7 Integrasi Pembelajaran Insiden dan Continuous<br>Improvement ..... | 286 |
| 9.7.1 Pembelajaran Insiden sebagai Elemen Process<br>Safety .....      | 287 |
| 9.7.2 Peran Investigasi Insiden dalam Pembelajaran<br>Organisasi.....  | 288 |
| 9.7.3 Budaya Pelaporan dan Just Culture .....                          | 288 |
| 9.7.4 Continuous Improvement dan Siklus PDCA ....                      | 289 |
| 9.7.5 Integrasi dengan Manajemen Perubahan<br>(MoC) .....              | 290 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.7.6 Pembelajaran Eksternal dan Benchmarking Industri.....                | 291 |
| 9.7.7 Kontribusi terhadap Fire Safety Engineering dan PSM.....             | 292 |
| 9.8 Tabel Ringkasan Standar Internasional Terkait Bahaya Ledakan Debu..... | 292 |
| 9.8.1 Standar NFPA dan Pendekatan Dust Hazard Analysis .....               | 294 |
| 9.8.2 ATEX dan Pengelolaan Atmosfer Eksplosif .....                        | 295 |
| 9.8.3 Standar ISO sebagai Kerangka Manajemen Risiko.....                   | 296 |
| 9.8.4 ANSI/ ASSP, HoRT, dan Inherently Safer Design .....                  | 296 |
| 9.8.5 Tabel Ringkasan Standar Internasional.....                           | 297 |
| 9.8.6 Sintesis dan Keterkaitan dengan Bab Selanjutnya .....                | 299 |
| 9.9 Diagram Konseptual Kerangka Manajemen Risiko Ledakan Debu.....         | 300 |
| 9.9.1 Struktur Umum Diagram Konseptual.....                                | 301 |
| 9.9.2 Integrasi Identifikasi Bahaya dan Analisis Risiko.....               | 302 |
| 9.9.3 Peran Hierarchy of Risk Treatment dan Inherently Safer Design .....  | 302 |
| 9.9.4 Integrasi Fire Safety Engineering dan Proteksi Ledakan .....         | 303 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.9.5 Pembelajaran Insiden dan Continuous Improvement.....                              | 303 |
| 9.9.6 Fungsi Diagram Konseptual dalam Buku Ajar dan Praktik Industri .....              | 305 |
| 9.10 Penyesuaian Kerangka untuk Buku Ajar dan Referensi Nasional dan Internasional..... | 306 |
| 9.10.1 Penyesuaian untuk Buku Ajar Akademik .....                                       | 307 |
| 9.10.2 Penyesuaian sebagai Buku Referensi Nasional .....                                | 309 |
| 9.10.3 Penyesuaian untuk Referensi Internasional ....                                   | 310 |
| 9.10.4 Harmonisasi Akademik, Industri, dan Regulasi.....                                | 311 |
| 9.10.5 Kontribusi Kerangka terhadap Pengembangan Pengetahuan dan Praktik .....          | 311 |
| 9.10.6 Perspektif Ontologis: Hakikat Risiko dan Bahaya Ledakan Debu .....               | 313 |
| 9.10.7 Perspektif Epistemologis: Cara Pengetahuan tentang Risiko Dibangun.....          | 314 |
| 9.10.8 Perspektif Aksiologis: Nilai dan Tujuan Pengelolaan Risiko .....                 | 315 |
| 9.10.9 Implikasi Filsafat Ilmu terhadap Penyesuaian Kerangka.....                       | 316 |
| 9.10.10 Relevansi bagi Pengembangan Buku Ajar dan Praktik Profesional .....             | 317 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.11 Implikasi bagi Industri di Indonesia (SNI dan Regulasi<br>Lokal dan Internasional) ..... | 317 |
| 9.11.1 Keterkaitan dengan Standar Nasional Indonesia<br>(SNI) .....                           | 318 |
| 9.11.2 Integrasi dengan Sistem Manajemen K3<br>(SMK3) .....                                   | 319 |
| 9.11.3 Relevansi terhadap Regulasi Ketenagakerjaan<br>dan Keselamatan .....                   | 320 |
| 9.11.4 Adopsi dan Harmonisasi dengan Standar<br>Internasional.....                            | 321 |
| 9.11.5 Tantangan dan Peluang Implementasi di<br>Indonesia .....                               | 321 |
| 9.11.6 Peran Kerangka Bab 9 dalam Konteks<br>Indonesia .....                                  | 327 |
| 9.12 Keterkaitan Bab 9 dengan Bab Sebelumnya .....                                            | 327 |
| 9.12.1 Integrasi dengan RCA, Fishbone, SCAT, dan 5-<br>Why .....                              | 328 |
| 9.12.2 Hubungan dengan Fire Safety Engineering<br>(FSE) .....                                 | 329 |
| 9.12.3 Keterkaitan dengan Standar dan Regulasi .....                                          | 333 |
| 9.12.4 Continuous Improvement dan Pembelajaran<br>Organisasi.....                             | 339 |
| 9.12.5 Sintesis Keterkaitan.....                                                              | 343 |
| 9.13 Penutup.....                                                                             | 348 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| BAB 10 SIMULASI DAN PEMODELAN MODERN DALAM ANALISIS LEDAKAN DEBU .....                                      | 349 |
| 10.1 Pendahuluan .....                                                                                      | 350 |
| 10.2 Peran Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam Memodelkan dan Memahami Ledakan Debu .....              | 350 |
| 10.2.1 Konsep Dasar CFD dalam Konteks Ledakan Debu .....                                                    | 350 |
| 10.2.2 Aplikasi CFD dalam Analisis Ledakan Debu..                                                           | 351 |
| 10.2.3 Kelebihan dan Keterbatasan CFD .....                                                                 | 352 |
| 10.3 Penggunaan Jaringan Syaraf Tiruan (Artificial Neural Networks) untuk Memperkirakan Sifat Ledakan ..... | 356 |
| 10.3.1 Latar Belakang Penggunaan ANN .....                                                                  | 356 |
| 10.3.2 Arsitektur dan Input Model ANN.....                                                                  | 357 |
| 10.3.3 Peran ANN dalam Manajemen Risiko .....                                                               | 357 |
| 10.4 Model Simulasi Monte Carlo dalam Analisis Bahaya Ledakan Debu.....                                     | 358 |
| 10.4.1 Penerapan Monte Carlo dalam Dust Hazard Analysis (DHA) .....                                         | 359 |
| 10.4.2. Peran Monte Carlo dalam Desain Proteksi Ledakan .....                                               | 361 |
| 10.4.3. Keterkaitan Monte Carlo dengan CFD dan ANN .....                                                    | 362 |
| 10.5 Pengembangan Peralatan Uji Ledakan yang Lebih Akurat .....                                             | 363 |
| 10.5.1 Evolusi Peralatan Uji Ledakan Debu.....                                                              | 363 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.5.2 Inovasi dalam Metode dan Instrumen Uji serta Integrasi Monte Carlo .....                | 364 |
| 10.5.3 Integrasi Eksperimen, CFD, ANN, dan Monte Carlo .....                                   | 365 |
| 10.6 Implikasi terhadap Praktik Keselamatan Industri (dengan Integrasi Model Monte Carlo)..... | 368 |
| 10.6.1 Peningkatan Kualitas Analisis Bahaya Debu (Dust Hazard Analysis) .....                  | 369 |
| 10.6.2 Optimalisasi Desain dan Proteksi Teknik.....                                            | 370 |
| 10.6.3 Dukungan Pengambilan Keputusan Berbasis Data .....                                      | 371 |
| 10.6.4 Penguatan Investigasi Insiden dan Pembelajaran Organisasi.....                          | 372 |
| 10.6.5 Dampak terhadap Regulasi, Audit, dan Budaya Keselamatan .....                           | 373 |
| 10.7 Kesimpulan .....                                                                          | 374 |
| BAGIAN IV STANDAR, REGULASI, DAN PROGRAM MANAJEMEN.....                                        | 380 |
| BAB 11 KERANGKA REGULASI DAN STANDAR.....                                                      | 380 |
| 11.1. Pendahuluan .....                                                                        | 381 |
| 11.2 Evolusi Standar Keselamatan Ledakan Debu .....                                            | 382 |
| 11.3 NFPA 660: Kerangka Terpadu Pengendalian Bahaya Debu .....                                 | 383 |
| 11.3.1 Dust Hazard Analysis (DHA) sebagai Pilar Utama.....                                     | 384 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.3.2 Hierarki Pengendalian Risiko dalam NFPA 660.....                    | 385 |
| 11.3.3 Integrasi Sistem Manajemen Keselamatan Proses .....                 | 387 |
| 11.3.4 Implikasi Praktis bagi Industri .....                               | 391 |
| 11.3.5 Filosofi Dasar NFPA 660 .....                                       | 392 |
| 11.3.6 Pengendalian Teknis dan Manajerial .....                            | 398 |
| 11.4. Standar Internasional (ISO/IEC 80079) dan Regulasi Eropa (ATEX)..... | 403 |
| 11.4.1 ISO/IEC 80079: Kerangka Global untuk Atmosfer Eksplosif Debu .....  | 404 |
| 11.4.2 Regulasi ATEX: Pendekatan Hukum dan Implementatif di Eropa .....    | 405 |
| 11.4.4 Integrasi Standar dalam Praktik Industri Global .....               | 407 |
| 11.4.5 Implikasi bagi Negara Berkembang dan Indonesia .....                | 408 |
| 11.5 Perspektif Regulasi di Indonesia: Tantangan dan Peluang .....         | 409 |
| 11.5.1 Latar Belakang Regulasi Keselamatan Debu di Indonesia .....         | 409 |
| 11.5.2 Kerangka Regulasi yang Berlaku di Indonesia .....                   | 410 |
| 11.5.3 Tantangan Utama Regulasi Debu Combustible di Indonesia .....        | 411 |

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.5.4 Peluang Penguatan Regulasi Debu Combustible di Indonesia .....                                         | 412        |
| 11.5.5 Arah Masa Depan Regulasi Debu di Indonesia .....                                                       | 414        |
| 11.6. Penutup.....                                                                                            | 420        |
| <b>BAB 12 MEMBANGUN PROGRAM MANAJEMEN DEBU COMBUSTIBLE (Combustible Dust Management Program – CDMP) .....</b> | <b>421</b> |
| 12.1. Pendahuluan .....                                                                                       | 422        |
| 12.2 Kebijakan dan Kepemimpinan: Komitmen Manajemen.....                                                      | 423        |
| 12.2.1 Pengendalian Debu sebagai Isu Kepemimpinan, Bukan Sekadar Teknis .....                                 | 423        |
| 12.2.2 Kebijakan Keselamatan Debu sebagai Fondasi Sistem .....                                                | 424        |
| 12.2.3 Kepemimpinan Proaktif dalam Mengelola Risiko Laten.....                                                | 426        |
| 12.2.4 Akuntabilitas dan Tanggung Jawab yang Terstruktur .....                                                | 427        |
| 12.2.5 Penyediaan Sumber Daya sebagai Bukti Komitmen.....                                                     | 428        |
| 12.2.6 Integrasi CDMP ke dalam Sistem Manajemen Perusahaan .....                                              | 430        |
| 12.2.7 Kepemimpinan dan Transformasi Budaya Keselamatan Debu.....                                             | 432        |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.2.8 Evaluasi Kinerja dan Perbaikan Berkelanjutan .....                   | 434 |
| 12.3 Pengembangan Kompetensi dan Kesadaran                                  |     |
| Pekerja.....                                                                | 435 |
| 12.3.1 Kompetensi sebagai Faktor Penentu Keberhasilan CDMP.....             | 437 |
| 12.3.2 Kerangka Kompetensi Berjenjang .....                                 | 440 |
| 12.3.3 Pelatihan Berkelanjutan dan Pembelajaran Organisasi.....             | 444 |
| 12.4 Dust Hazard Analysis (DHA) sebagai Inti                                |     |
| Program .....                                                               | 449 |
| 12.4.1 Peran Fundamental DHA dalam CDMP .....                               | 450 |
| 12.4.2 Ruang Lingkup dan Pendekatan Dust Hazard Analysis (DHA) .....        | 454 |
| 12.4.3 Dust Hazard Analysis sebagai Dokumen Hidup .....                     | 458 |
| 12.5 Pengendalian Teknis Berlapis (Layered Technical Controls).....         | 459 |
| 12.5.1 Prinsip Layer of Protection dalam Pengendalian Debu Combustible..... | 460 |
| 12.5.2 Elemen Pengendalian Teknis dalam Sistem Berlapis .....               | 461 |
| 12.6 Housekeeping sebagai Pengendalian Kritis Bahaya                        |     |
| Debu Combustible .....                                                      | 465 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.6.1 Peran Housekeeping dalam Pencegahan<br>Ledakan Sekunder.....                 | 466 |
| 12.6.2 Housekeeping Berbasis Risiko dan Standar<br>Internasional.....               | 467 |
| 12.7 Management of Change (MOC) dalam Pengendalian<br>Bahaya Debu Combustible ..... | 470 |
| 12.7.1 Perubahan sebagai Sumber Risiko Baru .....                                   | 471 |
| 12.7.2 Integrasi Debu Combustible dalam Proses<br>MOC .....                         | 472 |
| 12.8 Kesiapsiagaan dan Tanggap Darurat Ledakan<br>Debu .....                        | 475 |
| 12.8.1 Karakteristik Darurat Ledakan Debu .....                                     | 476 |
| 12.8.2 Elemen Program Tanggap Darurat Ledakan<br>Debu .....                         | 477 |
| 12.9 Audit, Monitoring, dan Peningkatan<br>Berkelanjutan .....                      | 481 |
| 12.9.1 Audit sebagai Alat Pembelajaran Sistemik.....                                | 482 |
| 12.9.2 Indikator Kinerja dan Continuous<br>Improvement.....                         | 484 |
| BAB 13 MASA DEPAN DAN KESIMPULAN.....                                               | 489 |
| 13.1. Pendahuluan .....                                                             | 490 |
| 13.2 Teknologi Pencegah dan Mitigasi Ledakan Masa<br>Depan.....                     | 490 |
| 13.2.1 Sistem Monitoring Cerdas dan Prediktif .....                                 | 492 |
| 13.2.2 Rekayasa Proteksi Ledakan Generasi Lanjut ..                                 | 493 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.2.3 Otomatisasi Housekeeping dan Desain<br>Inherently Safer.....                                    | 495 |
| Tabel 13.1 Ringkasan Teknologi Pencegah dan Mitigasi                                                   |     |
| Ledakan Debu Masa Depan .....                                                                          | 496 |
| 13.3 Pentingnya Penelitian Berkelanjutan.....                                                          | 498 |
| 13.3.1 Dinamika Bahaya Debu di Industri Modern....                                                     | 499 |
| 13.3.2 Kesenjangan Pengetahuan dan Tantangan<br>Riset .....                                            | 500 |
| 13.3.3 Kolaborasi Global dan Konteks Lokal.....                                                        | 501 |
| 13.4 Peran Explosion Protection Document (EPD) dan<br>Model Simulasi dalam Keselamatan Masa Depan .... | 503 |
| 13.4.1 EPD sebagai Kerangka Integrasi Teknologi<br>Analitik .....                                      | 504 |
| 13.4.2 Peran Model Simulasi (CFD, ANN, dan Monte<br>Carlo) dalam EPD Masa Depan.....                   | 505 |
| 13.5 Kesimpulan Utama: Dari Reaktif ke Proaktif .....                                                  | 511 |
| 13.6 Penutup Reflektif.....                                                                            | 513 |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                                                    | 516 |
| Lampiran A.....                                                                                        | 524 |
| Lampiran B.....                                                                                        | 533 |
| Lampiran C .....                                                                                       | 537 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Ledakan debu gula .....                             | 4  |
| Gambar 2. Insiden ledakan debu gula .....                     | 6  |
| Gambar 3. Kombinasi Bahan Organik berbahaya .....             | 10 |
| Gambar 4. Pembelajaran kasus ledakan .....                    | 11 |
| Gambar 5. Faktor yang Mempengaruhi Material Organik.          | 18 |
| Gambar 6. Segitiga Api .....                                  | 19 |
| Gambar 7. Segitiga Api dengan Rantai reaksi kimia .....       | 20 |
| Gambar 8. Segilima ledakan debu (Pentagon).....               | 24 |
| Gambar 9. Perbandingan Ledakan debu berdasarkan material..... | 27 |
| Gambar 10. Alat Uji debu .....                                | 39 |
| Gambar 11. Faktor yang mempengaruhi Ledakan Debu....          | 50 |
| Gambar 12. Bahaya Percikan Listrik di area berdebu.....       | 55 |
| Gambar 13. Sumber Panas dari permukaan yang panas ....        | 57 |
| Gambar 14. Api terbuka dan Pekerjaan panas .....              | 59 |
| Gambar 15. Percikan Api dan Gangguan mekanik.....             | 61 |
| Gambar 16. Mekanisme penyalaan dari debu terdeposit ...       | 63 |
| Gambar 17. Primer dan Secondary Ledakan Debu .....            | 66 |
| Gambar 18. Hazard Operability Study terkait Debu .....        | 72 |
| Gambar 19. Klasifikasi Area Bahaya terkait Debu .....         | 74 |
| Gambar 20. Klasifikasi Area Bahaya terkait Debu .....         | 74 |
| Gambar 21. Sistem Penggilingan dengan Hammer Mill ....        | 78 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 22. Sistem Penggilungan dan Pencegahan<br>Bahaya .....              | 79  |
| Gambar 23. Sistem Pengumpul Debu (Dust Collector) dan<br>keamanan .....    | 80  |
| Gambar 24. Tantangan dalam Penilaian Risiko<br>Konvensional .....          | 83  |
| Gambar 25. Pendekatan probabilistic untuk debu rendah<br>reaktifitas ..... | 87  |
| Gambar 26. Prinsip Dasar Pencegahan Ledakan Debu .....                     | 99  |
| Gambar 27. Prinsip Pengendalian Debu .....                                 | 106 |
| Gambar 28. Pengendalian Sumber Penyalaan .....                             | 115 |
| Gambar 29. Inerting untuk Mencegah Ledakan Debu .....                      | 124 |
| Gambar 30. Menjaga Keselamatan Industri dari ledakan<br>Debu .....         | 129 |
| Gambar 31. Mitigasi Ancaman Ledakan Debu.....                              | 133 |
| Gambar 32. Peledakan terarah untuk Pengendalian<br>Ledakan .....           | 141 |
| Gambar 33. Pemadaman Ledakan (Suppresion)                                  |     |
| Gambar 34. Isolasi Ledakan.....                                            | 149 |
| Gambar 35. Pemilihan dan Integrasi Sistem Mitigasi.....                    | 158 |
| Gambar 36. Pemilihan Lima Pilar Analisis.....                              | 162 |
| Gambar 37. Filosofi Pertahanan Berlapis .....                              | 166 |
| Gambar 38. Seleksi Tahapan Pencegahan Ledakan .....                        | 168 |
| Gambar 39. Strategi Mitigasi Ledakan.....                                  | 171 |
| Gambar 40. Zonasi Bahaya Debu di Industri.....                             | 173 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 41. Titik Kritis Bahaya Debu.....                                                                        | 177 |
| Gambar 42. Gambaran Risiko Ledakan Dust Collector.....                                                          | 184 |
| Gambar 43. Strategi Mitigasi terpadu .....                                                                      | 190 |
| Gambar 44. Titik kritis Penggilingan dan Penyimpanan .                                                          | 198 |
| Gambar 45. Titik kritis Sistem conveyor dan bucket .....                                                        | 205 |
| Gambar 46. Silo Penyimpanan; Bahaya dan<br>Perlindungan .....                                                   | 208 |
| Gambar 47. Prinsip Proteksi Silo .....                                                                          | 213 |
| Gambar 48. Pembuatan Dokumen Proteksi Ledakan .....                                                             | 217 |
| Gambar 49. Pembuatan Dokumen Proteksi Ledakan.....                                                              | 241 |
| Gambar 50. Analisa Tulang ikan (Fishbone).....                                                                  | 245 |
| Gambar 51. Analisa Akar Penyebab Ledakan fasilitas<br>Pengolahan Pertanian.....                                 | 249 |
| Gambar 52. Analisis Terintegrasi SCAT – Bowtie – Fishbone<br>– 5 Why Pabrik Pengolahan Makanan (tepung gandum). | 252 |
| Gambar 53. Analisis Terintegrasi SCAT – Bowtie – Fishbone<br>– 5 Why Pabrik Pengolahan Makanan (tepung gandum). | 252 |
| Gambar 54. Analisa Fishbone - Bowtie Ledakan Pabrik<br>Makanan.....                                             | 252 |
| Gambar 55. Analisa SCAT Ledakan Pabrik logam .....                                                              | 255 |
| Gambar 56. Analisa SCAT-Fishbone-Bowtie Ledakan Pabrik<br>logam .....                                           | 255 |
| Gambar 57. Analisa SCAT-Fishbone-Bowtie Ledakan Pabrik<br>logam .....                                           | 258 |
| Gambar 58. Dasar Manajemen Risiko Ledakan Debu .....                                                            | 262 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 59. Diagram Kerangka Kerja Integrasi Manajemen Risiko .....                       | 269 |
| Gambar 60. Analisa Risiko Ledakan Debu.....                                              | 275 |
| Gambar 61. Hierarchy of risk treatment (HoRT) with inherently safer design concepts..... | 281 |
| Gambar 62. Standar dan Regulasi Ledakan Debu.....                                        | 284 |
| Gambar 63. Pembelajaran Kecelakaan dari Ledakan Debu.....                                | 291 |
| Gambar 64. Integrasi Pembelajaran insiden dan Perbaikan berkelanjutan .....              | 294 |
| Gambar 65. Kerangka Manajemen Risiko Ledakan Debu.....                                   | 304 |
| Gambar 66. Penyesuaian Kerangka Buku Ajar & Referensi.....                               | 309 |
| Gambar 67. Implikasi Industri di Indonesia .....                                         | 319 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 1. Perbandingan Singkat:.....                                                          | 27  |
| Tabel 2. Parameter Karakteristik Ledakan Debu<br>(Contoh).....                               | 33  |
| Tabel 3. Klasifikasi St berikut .....                                                        | 40  |
| Tabel 4. Parameter Ledakan debu .....                                                        | 41  |
| Tabel 5. Tabel 5. Ringkasan Pengaruh Faktor Fisika-Kimia<br>terhadap Parameter Ledakan ..... | 48  |
| Tabel 6 Ringkasan Standar Internasional Terkait Bahaya<br>Ledakan Debu.....                  | 297 |
| Tabel 7 Pemetaan Standar Nasional dan Internasional<br>Terkait Bahaya Ledakan Debu .....     | 323 |
| Tabel 8 Perbandingan Regulasi Pengendalian Bahaya Debu<br>Combustible.....                   | 416 |
| Tabel 9 Ringkasan Teknologi Pencegah dan Mitigasi<br>Ledakan Debu Masa Depan .....           | 496 |

## GLOSARIUM ISTILAH BAHAYA DEBU COMBUSTIBLE (A-Z)

| NO | Abjad | Istilah                         | Definisi                                                                                                                            |
|----|-------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | A     | Accumulated Dust                | Debu yang mengendap pada permukaan bangunan atau peralatan yang dapat menjadi bahan bakar <b>ledakan sekunder</b> (NFPA 652).       |
| 2  |       | ATEX                            | Kerangka regulasi UE untuk atmosfer eksplosif, terdiri dari <b>ATEX Workplace 1999/92/EC</b> dan <b>ATEX Equipment 2014/34/EU</b> . |
| 3  |       | Auto-Ignition Temperature (AIT) | Suhu minimum di mana debu menyala tanpa sumber api eksternal (EN 50281).                                                            |
| 4  | B     | Bulk Density                    | Massa debu per satuan volume; memengaruhi kecepatan reaksi dan tekanan ledakan (NFPA 68).                                           |
| 5  |       | Burning Rate                    | Laju pembakaran debu dalam kondisi tertentu.                                                                                        |

|   |   |                                                               |                                                                                                                                                                                                                                            |
|---|---|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 | C | Combustible Dust                                              | Partikel padat halus yang dapat terbakar atau meledak ketika terdispersi di udara (NFPA 652).                                                                                                                                              |
| 7 |   | <b>CDMP<br/>(Combustible Dust<br/>Management<br/>Program)</b> | Sistem manajemen terintegrasi untuk mengendalikan bahaya kebakaran dan ledakan debu melalui DHA, engineering control, housekeeping, ignition control, dokumentasi, pelatihan, audit, dan kesiapsiagaan darurat (NFPA 652, NFPA 660, ATEX). |
| 8 |   | Confinement                                                   | Kondisi ruang tertutup yang meningkatkan tekanan ledakan (NFPA 68).                                                                                                                                                                        |
| 9 | D | Dust Hazard Analysis (DHA)                                    | Analisis sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengendalikan bahaya debu mudah terbakar (NFPA 652 - mandatory).                                                                                                             |

|    |   |                                            |                                                                                                                                                |
|----|---|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 |   | Deflagration                               | Reaksi pembakaran cepat dengan kecepatan rambat di bawah kecepatan suara.                                                                      |
| 11 | E | <b>EPD (Explosion Protection Document)</b> | Dokumen wajib ATEX yang menjelaskan zonasi area, hasil penilaian risiko, serta langkah pencegahan dan proteksi ledakan (Directive 1999/92/EC). |
| 12 |   | Electrostatic Discharge (ESD)              | Pelepasan muatan listrik statis yang dapat menjadi sumber penyalaaan.                                                                          |
| 13 |   | Explosion Isolation                        | Sistem pencegah rambatan api dan tekanan ke peralatan lain (NFPA 69).                                                                          |
| 14 | F | Fire Pentagon                              | Konsep pembakaran debu: bahan bakar, oksigen, sumber panas, dispersi, dan confinement.                                                         |
| 15 |   | Flash Fire                                 | Pembakaran cepat awan debu tanpa overpressure signifikan.                                                                                      |
| 16 | G | Grounding & Bonding                        | Metode pengendalian listrik statis dengan pembumian dan pengikatan peralatan (NFPA 77).                                                        |

|    |   |                                    |                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|---|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17 |   | Grain Dust                         | Debu hasil pertanian dengan nilai Kst tinggi dan riwayat insiden besar.                                                                                                                                                                      |
| 18 | H | Hybrid Mixture                     | Campuran debu dan gas/uap mudah terbakar yang meningkatkan keparahan ledakan.                                                                                                                                                                |
| 19 |   | HORT (Hierarchy of Risk Treatment) | Urutan prioritas pengendalian risiko yang digunakan dalam manajemen risiko, K3, fire safety, dan process safety untuk memastikan risiko diturunkan secara paling efektif dan berkelanjutan, bukan sekadar dikendalikan secara administratif. |
| 20 |   | Housekeeping                       | Program pembersihan terencana untuk mencegah akumulasi debu berbahaya (NFPA 652).                                                                                                                                                            |
| 21 | I | Ignition Source                    | Sumber energi yang dapat memicu penyalaan (panas, listrik, mekanis).                                                                                                                                                                         |
| 22 |   | Inerting                           | Penurunan kadar oksigen dengan gas inert untuk                                                                                                                                                                                               |

|    |   |                                    |                                                                                                                                                                  |
|----|---|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |                                    | mencegah ledakan (NFPA 69).                                                                                                                                      |
| 23 | J | Jet Flame                          | Semburan api berkecepatan tinggi dari vent ledakan.                                                                                                              |
| 24 | K | Kst                                | Indeks keparahan ledakan debu (bar m/s) untuk klasifikasi eksplosivitas.                                                                                         |
| 25 | L | Layer Thickness                    | Ketebalan lapisan debu yang berkontribusi pada ledakan sekunder.                                                                                                 |
| 26 |   | LEL                                | Konsentrasi minimum debu di udara yang dapat menghasilkan ledakan.                                                                                               |
| 27 | M | MIE (Minimum Ignition Energy)      | Konsentrasi minimum debu di udara (biasanya dinyatakan dalam g/m <sup>3</sup> ) yang masih dapat menyala atau meledak bila terkena sumber penyalan yang efektif. |
| 28 |   | MIC (Minimum Ignition Concentrate) | Energi listrik atau panas minimum yang diperlukan untuk menyalakan awan debu yang mudah terbakar pada kondisi pengujian tertentu (konsentrasi debu,              |

|    |  |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----|--|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |  |                                    | ukuran partikel, kelembapan, dan atmosfer).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 29 |  | MIT (Minimum Ignition Temperature) | Suhu minimum penyalaaan debu dalam bentuk awan atau lapisan.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 30 |  | MOC (Management Of Change)         | Proses manajemen formal dan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, mengendalikan, dan mendokumentasikan setiap perubahan pada fasilitas, peralatan, material, proses, organisasi, atau prosedur kerja sebelum perubahan tersebut diterapkan, guna memastikan bahwa risiko keselamatan, kesehatan, lingkungan, dan keandalan operasi tetap terkendali. |
| 31 |  | Monte Carlo Simulation             | Metode statistik probabilistik untuk memodelkan ketidakpastian dan                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|    |   |                                     |                                                                                         |
|----|---|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |                                     | skenario risiko ledakan dalam QRA.                                                      |
| 32 | N | NFPA 652                            | Standar fundamental pengelolaan bahaya debu (wajib DHA & manajemen berkelanjutan).      |
| 33 |   | NFPA 660                            | Standar terpadu untuk debu dan particulate solids.                                      |
| 34 | O | Overpressure                        | Tekanan berlebih akibat ledakan yang menyebabkan kerusakan struktur dan peralatan.      |
| 35 |   | Oxygen Limiting Concentration (LOC) | Konsentrasi oksigen maksimum agar pembakaran tidak dapat terjadi.                       |
| 36 | P | Pmax                                | Tekanan maksimum yang dihasilkan oleh ledakan debu.                                     |
| 37 |   | Primary Explosion                   | Ledakan awal dalam peralatan tertutup.                                                  |
| 38 | Q | QRA (Quantitative Risk Assessment)  | Analisis kuantitatif risiko menggunakan probabilitas dan konsekuensi (ISO 31000, CCPS). |

|    |   |                           |                                                                               |
|----|---|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 39 | R | Secondary Explosion       | Ledakan lanjutan akibat debu terakumulasi yang terangkat oleh ledakan primer. |
| 40 |   | Risk-Based Design         | Pendekatan desain proteksi berbasis tingkat risiko.                           |
| 41 | S | Silo Explosion            | Ledakan dalam silo akibat confinement ekstrem dan massa debu besar.           |
| 42 |   | Spark Detection System    | Sistem deteksi dan pemadaman percikan api pada ducting/conveyor.              |
| 43 | T | Turbulence                | Gangguan aliran yang meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran.                |
| 44 |   | Thermal Decomposition     | Penguraian material akibat panas yang menghasilkan gas mudah terbakar.        |
| 45 | U | Unconfined Dust Explosion | Ledakan debu di ruang terbuka dengan dampak tekanan lebih rendah.             |
| 46 | V | Venting Area              | Luas bukaan pelepas tekanan ledakan yang dirancang secara teknis (NFPA 68).   |

|    |   |                                               |                                                                                             |
|----|---|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 47 |   | Vacuum Cleaning (Industrial)                  | Metode pembersihan debu yang aman dibandingkan penyapuan kering.                            |
| 48 | W | Work Permit (Hot Work Permit)                 | Sistem izin kerja panas untuk mengendalikan sumber penyalaaan.                              |
| 49 | X | Explosion Index (X-Factor)                    | Parameter teknik dalam perhitungan desain proteksi ledakan.                                 |
| 50 | Y | Yield Factor                                  | Faktor efisiensi pelepasan energi ledakan.                                                  |
| 51 | Z | Zoning (Hazardous Area Classification – Dust) | Klasifikasi area berdasarkan frekuensi dan durasi atmosfer eksplosif debu (IEC 60079-10-2). |

# BAHAYA DEBU RISIKO & PENCEGAHAN LEDAKAN INDUSTRI

Keselamatan kerja merupakan amanah yang tidak hanya bersifat profesional, tetapi juga bernilai ibadah. Dalam Islam, setiap bentuk bahaya yang dapat diprediksi dan dicegah—termasuk bahaya debu mudah terbakar (combustible dust)—wajib dikelola dengan penuh tanggung jawab, karena menyangkut perlindungan jiwa dan kemaslahatan bersama.

Allah SWT berfirman: “Dan janganlah kamu menjatuhkan dirimu sendiri ke dalam kebinasaan” (QS. Al-Baqarah [2]: 195), serta mengingatkan pentingnya ilmu dalam setiap tindakan: “Apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui?” (QS. Az-Zumar [39]: 9).

Rasulullah ﷺ menegaskan prinsip pencegahan bahaya melalui sabdanya: “Tidak boleh menimbulkan bahaya dan tidak boleh membalas bahaya dengan bahaya” (HR. Ibnu Majah), dan menekankan amanah serta profesionalisme dalam bekerja: “Setiap kalian adalah pemimpin, dan setiap kalian akan dimintai pertanggungjawaban atas kepemimpinannya” (HR. Bukhari dan Muslim), serta “Sesungguhnya Allah mencintai apabila seseorang di antara kalian melakukan suatu pekerjaan, ia melakukannya dengan itqan (profesional dan sungguh-sungguh)” (HR. Thabrani).

Dengan landasan ini, buku Bahaya Debu Combustible diharapkan menjadi sarana ilmu dan pengingat bahwa pencegahan kebakaran dan ledakan bukan hanya kewajiban teknis, melainkan bagian dari amanah moral dan tanggung jawab spiritual

