

ANALISIS QRA DAN OPTIMALISASI TATA LETAK FASILITAS PABRIK DETONATOR: STUDI KASUS LEDAKAN PINDAD 2010

Pramudya Pratama Wardoyo¹

Email: pramudya.wardoyo@outlook.com

ABSTRACT

The explosive manufacturing industry carries a significant risk of major accidents with high fatality potential, where the estimated blast impact radius from 5 kg of Net Explosive Quantity (NEQ) without physical protection can reach up to 41 meters. This study aims to optimize the facility layout of a detonator production unit to enhance occupational safety standards through measurable safety distance minimization. The research methodology employs a descriptive qualitative approach integrated with Quantitative Risk Assessment (QRA) modeling to compare the effectiveness of barricaded versus unbarricaded distance scenarios. The findings indicate that the implementation of engineering controls, specifically earth mounds, can optimize land utilization by reducing the required safety distance by 50%, or down to 20.5 meters, while maintaining blast overpressure below the safe threshold of 1 psi at inhabited areas. In conclusion, the application of QRA methods in facility layout design is significantly proven to increase land-use efficiency without compromising the integrity of protection for personnel and corporate assets.

Keywords: QRA, Safety Distance, Detonator, Layout Optimization.

ABSTRAK

Operasional manufaktur bahan peledak menyimpan risiko insiden berskala besar dengan konsekuensi fatalitas yang signifikan, di mana tanpa adanya sistem proteksi, radius bahaya dari 5 kg Net Explosive Quantity (NEQ) dapat menjangkau jarak hingga 41 meter. Studi ini difokuskan pada upaya restrukturisasi tata letak unit produksi detonator dengan tujuan meningkatkan proteksi keselamatan kerja melalui reduksi jarak aman yang terukur. Penelitian ini menerapkan pendekatan kualitatif deskriptif yang dipadukan dengan pemodelan Quantitative Risk Assessment (QRA) untuk mengomparasi efektivitas antara skenario jarak tanpa penghalang (unbarricaded) dengan jarak berpenghalang (barricaded). Temuan riset mengindikasikan bahwa integrasi engineering control berupa gundukan tanah (earth mound) mampu mengoptimalkan pemanfaatan lahan dengan memangkas jarak aman sebesar 50 persen atau menjadi 20,5 meter, dengan tetap menjaga tekanan ledakan di bawah ambang batas aman 1 psi pada area publik. Secara teoretis, implementasi QRA dalam perancangan fasilitas terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi ruang tanpa mendegradasi standar perlindungan bagi personel maupun infrastruktur

Kata Kunci : QRA, Safety Distance, Detonator, Layout Optimization.

1. PENDAHULUAN

Fasilitas manufaktur komponen peledak, khususnya pada tahap perakitan detonator, merupakan zona kerja dengan profil risiko tinggi akibat sensitivitas material terhadap energi eksternal seperti panas dan listrik statis. Catatan sejarah industri menunjukkan bahwa kegagalan sistem pada lini produksi seringkali memicu dampak destruktif, sebagaimana insiden ledakan yang terjadi pada fasilitas Divisi Munisi PT Pindad, Turen pada tahun 2010 yang menghancurkan sebagian besar struktur gedung dan merenggut nyawa pekerja. Dalam disiplin keselamatan kerja, mitigasi risiko primer harus diintegrasikan sejak fase perancangan teknis melalui penentuan safety distance yang berbasis pada volume Net Explosive Quantity (NEQ). Secara teknis, akumulasi bahan peledak sebesar 5 kg memerlukan radius sterilisasi minimal 41 meter jika tidak didukung oleh penghalang

fisik guna melindungi area berpenghuni. Mengingat keterbatasan ketersediaan lahan di sektor industri pertambangan, diperlukan sebuah formulasi rekayasa yang presisi untuk menjaga keseimbangan antara keamanan dan produktivitas lahan.

Dasar pemikiran dalam pengendalian bahaya ini mengacu pada hierarki kontrol yang memprioritaskan rekayasa teknik di atas kendali administratif. Salah satu instrumen analisis yang mumpuni untuk mengukur risiko secara objektif adalah Quantitative Risk Assessment (QRA). Metode ini memanfaatkan komputasi matematis untuk memprediksi konsekuensi ledakan melalui parameter Scaled Distance. Prinsip ini menegaskan bahwa magnitudo gelombang kejut berbanding terbalik dengan jarak dari sumber ledakan. Pemanfaatan tanggul atau earth mound sebagai penghalang fisik merupakan strategi rekayasa untuk meredam energi kinetik dan mengalihkan tekanan ke arah vertikal. Melalui penyesuaian nilai faktor perlindungan (K-factor), risiko bahaya besar dapat dipetakan secara lebih akurat dibandingkan sekadar mengandalkan prosedur operasional manual yang rentan terhadap kesalahan manusia.

Kebaruan dalam riset ini menonjolkan transisi dari analisis risiko kualitatif konvensional menuju pendekatan kuantitatif yang lebih detail. Jika penelitian terdahulu oleh Wardoyo, Pramudya P (2026) baru menyentuh identifikasi bahaya melalui metode Bow-Tie, artikel ini melangkah lebih jauh dengan menguantifikasi kebutuhan jarak aman secara fisik. Perbedaan fundamental terletak pada pembuktian empiris mengenai efektivitas barrier dalam mereduksi radius bahaya hingga setengah dari jarak standar. Penelitian ini menekankan bahwa data numerik dari QRA merupakan instrumen strategis dalam pengambilan keputusan manajerial di sektor industri bahan peledak. Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah merumuskan optimasi tata letak unit produksi melalui penerapan QRA demi memperkuat sistem perlindungan keselamatan bagi seluruh pekerja dan aset korporasi.

2. METODE PENELITIAN

Studi ini mengadopsi desain riset kualitatif deskriptif yang menekankan pada pemodelan risiko berbasis angka. Kerangka penelitian dirancang untuk menguji efektivitas variabel kendali teknis dalam meminimalkan dampak eksploitasi peledak melalui analisis kasus nyata. Fokus penelitian diarahkan pada evaluasi retrospektif terhadap insiden ledakan di Divisi Munisi PT Pindad, Turen pada tahun 2010, yang kemudian divalidasi kembali menggunakan data teknis periode awal tahun 2026. Variabel penelitian mencakup muatan peledak (NEQ) sebagai faktor independen, sementara radius aman dan tekanan udara (overpressure) bertindak sebagai faktor dependen. Keberadaan tanggul tanah berperan sebagai variabel kontrol untuk membedakan level perlindungan antara skema barricaded dan unbarricaded.

Proses pengambilan sampel dilakukan dengan metode purposive sampling, di mana kriteria utama adalah unit produksi dengan kapasitas batch maksimum 5 kg NEQ. Pemilihan ini didasarkan pada potensi risiko eskalasi tertinggi sesuai dengan profil kegagalan sistematis di masa lalu. Data riset dihimpun dari sumber sekunder yang mencakup laporan resmi investigasi kecelakaan kerja,

blueprint fasilitas pasca-insiden Divisi Munisi PT Pindad, Turen, serta referensi teknis dari Chemical Safety Board (CSB) terkait kejadian serupa di skala global. Teknik koleksi data melibatkan penelaahan dokumen keselamatan dan pengukuran radius terdampak guna mengevaluasi korelasi antara volume material peledak dengan ketahanan struktur bangunan.

Tahapan analisis data dikelola secara sistematis melalui kerangka kerja QRA yang mencakup perhitungan kalkulatif Scaled Distance. Analisis ini bertujuan memverifikasi apakah standar jarak yang diterapkan saat terjadi insiden di masa lampau telah sesuai dengan kriteria keselamatan modern. Perbandingan dilakukan pada dua model tata letak: desain tanpa penghalang dengan nilai $K=24$ dan desain optimal berbasis tanggul dengan nilai $K=12$, merujuk pada standar Department of Defense Explosives Safety Board (DDESB). Hasil kalkulasi kemudian dinarasikan secara deskriptif untuk merumuskan efisiensi pemanfaatan ruang dan tingkat reduksi paparan risiko di area berpenghuni melalui pendekatan rekayasa fisik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kuantitatif dalam studi ini diawali dengan menetapkan skenario dasar ledakan pada unit perakitan detonator dengan parameter muatan netto atau Net Explosive Quantity (NEQ) sebesar 5 kg. Penentuan angka ini didasarkan pada kapasitas maksimum satu batch produksi yang umum digunakan di industri, yang sekaligus menjadi titik kritis dalam penilaian risiko mayor. Berdasarkan perhitungan menggunakan rumus Scaled Distance, jarak aman tanpa penghalang fisik (unbarricaded distance) ditentukan oleh faktor perlindungan $K=24$ untuk melindungi bangunan berpenghuni dari risiko kerusakan struktural dan luka akibat pecahan kaca. Hasil komputasi menunjukkan bahwa radius sterilisasi minimal yang harus dipenuhi adalah 41 meter dari titik pusat ledakan. Dalam konteks tata letak fasilitas industri, radius ini menciptakan zona kosong (buffer zone) yang sangat luas dan seringkali melampaui batas lahan yang tersedia, sehingga membatasi ekspansi kapasitas produksi. Data perbandingan kebutuhan jarak antara kondisi tanpa penghalang dan penggunaan rekayasa teknik disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 1. Komparasi Parameter Jarak Aman Berdasarkan Klasifikasi Perlindungan

Klasifikasi Perlindungan	Faktor K	Formula Perhitungan Jarak	Jarak Aman (D)
Tanpa Penghalang (<i>unbarricade</i>)	24	$D = 25 \times 5^{\frac{1}{3}}$	41.0 m
Dengan Penghalang (<i>barricade</i>)	12	$D = 12 \times 5^{\frac{1}{3}}$	20.5 m
Jarak Antar Fasilitas (<i>intra-plant</i>)	6	$D = 6 \times 5^{\frac{1}{3}}$	10.2 m

Penerapan rekayasa teknik melalui pembangunan tanggul tanah (*earth mound*) memungkinkan penggunaan nilai $K=12$, yang secara matematis mereduksi kebutuhan jarak aman sebesar 50 persen. Sebagaimana tercantum dalam Tabel 1, jarak aman dapat dipangkas menjadi hanya 20,5 meter. Reduksi ini memiliki signifikansi yang besar dalam manajemen aset lahan, di mana area yang sebelumnya harus dikosongkan kini dapat dimanfaatkan untuk fasilitas pendukung lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode QRA mampu mengubah paradigma keselamatan dari sekadar pemenuhan regulasi administratif menuju optimasi rekayasa yang terukur.

Evaluasi terhadap efektivitas penghalang fisik juga dilakukan dengan memetakan sebaran tekanan ledakan atau *peak overpressure*. Dalam standar keselamatan kerja industri energi dan bahan peledak, tekanan sebesar 1 psi (*pounds per square inch*) merupakan ambang batas maksimal yang diizinkan

untuk mengenai bangunan berpenghuni seperti kantor atau jalan umum. Tekanan di atas 1 psi mulai menimbulkan risiko kerusakan non-struktural seperti pecahnya kaca jendela, sementara tekanan di atas 5 psi dapat menyebabkan kegagalan struktur dinding. Pemetaan distribusi tekanan berdasarkan radius ledakan untuk muatan 5 kg NEQ dipaparkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komparasi Parameter Jarak Aman Berdasarkan Klasifikasi Perlindungan

Radius Jarak (m)	Prediksi Tekanan (psi)	Dampak Potensial Bangunan
10.2	11.80	Kerusakan struktur beton berat
20.5	3.90	Kerusakan dinding bata dan kaca
41.0	0.95	Ambang batas aman tanpa kerusakan

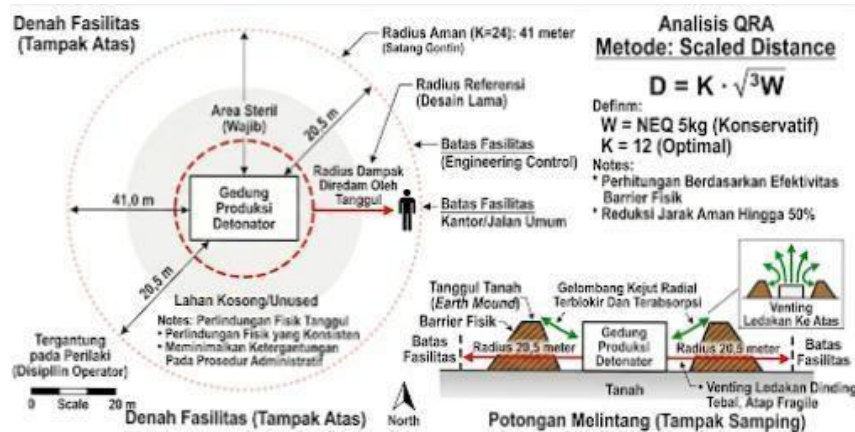
Berdasarkan analisis pada Tabel 2, terlihat bahwa pada jarak 20,5 meter, tekanan ledakan masih berada di angka 3,90 psi. Tanpa adanya tanggul, jarak ini belum memenuhi kriteria keselamatan bagi bangunan berpenghuni. Namun, dengan integrasi tanggul tanah yang dirancang secara teknis sesuai standar *Department of Defense Explosives Safety Board* (DDESB), gelombang kejut samping akan diserap dan diarahkan secara vertikal. Fenomena ini menyebabkan tekanan yang merambat secara horizontal ke area berpenghuni pada jarak 20,5 meter dapat diredam hingga di bawah 1 psi. Hal ini mempertegas bahwa keberadaan barrier fisik memberikan perlindungan yang jauh lebih konsisten dibandingkan hanya mengandalkan faktor jarak udara.

Tinjauan retrospektif terhadap insiden ledakan di Divisi Munisi PT Pindad, Turen pada tahun 2010 memberikan data validasi lapangan yang krusial. Pada kejadian tersebut, penggunaan desain bangunan dengan atap ringan (*fragile roof*) terbukti mampu menjalankan fungsi *directional blast venting*, di mana energi ledakan diarahkan ke atas sehingga meminimalkan tekanan lateral ke bangunan sekitarnya. Namun, kerusakan atap yang mencapai 75 persen mengonfirmasi bahwa arah ledakan vertikal tetap memerlukan dukungan tanggul horizontal untuk memastikan perlindungan bagi personel yang mungkin berada di luar gedung pada saat kejadian. Skema optimasi yang menggabungkan prinsip *venting* dan penggunaan barrier fisik dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 di bawah ini.

Gambar 1. Skema Desain Konvensional Tanpa Penghalang Fisik (*Unbarricaded*)



Gambar 2. Skema Desain Optimasi QRA Dengan Penghalang Fisik (*Barricaded*)



Integrasi tanggul dalam desain tata letak fasilitas memberikan manfaat ekonomi yang signifikan bagi perusahaan melalui optimalisasi pemanfaatan lahan industri. Analisis terhadap luas area steril menunjukkan perbedaan yang mencolok antara kedua skenario desain tersebut. Dengan berkurangnya radius aman dari 41 meter menjadi 20,5 meter, luas area *buffer zone* yang diperlukan menyusut dari 5.281 meter persegi menjadi hanya 1.320 meter persegi. Efisiensi penggunaan lahan sebesar 75 persen ini memberikan fleksibilitas bagi manajemen dalam merencanakan pengembangan kapasitas produksi pada lahan yang terbatas tanpa melanggar ketentuan keselamatan.

Tabel 3. Analisis Efisiensi Lahan dan Area Sterilisasi

Parameter Perbandingan	Desain Konvensional	Desain Optimasi QRA
Jarak Aman Kritis (m)	41.0	20.5
Luas Area Steril	5.281	1.320
Persentase Pemanfaatan Lahan	0%	75%

Keseluruhan hasil pembahasan ini menegaskan bahwa transformasi dari kontrol administratif menuju *engineering control* berbasis QRA menciptakan lingkungan kerja yang lebih resilien. Pendekatan ini tidak hanya menjawab tantangan keselamatan kerja terhadap risiko ledakan primer maupun *electrostatic discharge* (ESD), tetapi juga memberikan solusi strategis dalam manajemen aset perusahaan. Penggunaan data kuantitatif dalam penentuan tata letak fasilitas memastikan bahwa setiap keputusan manajerial didasarkan pada perhitungan risiko yang presisi, yang merupakan inti dari disiplin Manajemen Teknologi.

4. KESIMPULAN

Hasil akhir penelitian menyimpulkan bahwa integrasi metodologi QRA ke dalam perancangan infrastruktur industri bahan peledak mampu memberikan solusi ganda berupa peningkatan level keselamatan dan optimalisasi aset lahan. Berdasarkan simulasi terhadap 5 kg NEQ dengan merujuk pada parameter teknis di Divisi Munisi PT Pindad, Turen, ditemukan bahwa implementasi kontrol rekayasa teknik mampu memangkas kebutuhan jarak aman secara signifikan dari 41 meter menjadi 20,5 meter tanpa mengorbankan integritas proteksi. Penggunaan tanggul fisik terbukti secara matematis dan teknis dapat mereduksi intensitas gelombang kejut, sehingga menjamin keselamatan personel pada jarak yang lebih efisien dibandingkan model sterilisasi udara tradisional. Penentuan jarak aman dalam penelitian ini selaras dengan mandat Perkap No. 17 Tahun 2017 mengenai pengawasan dan pengendalian bahan peledak komersial, di mana setiap fasilitas penyimpanan dan

produksi wajib memenuhi kriteria sterilisasi wilayah berdasarkan klasifikasi bahan peledak yang dikelola.

Rekomendasi praktis dari penelitian ini ditujukan kepada manajemen industri terkait untuk menjadikan perhitungan QRA sebagai standar baku dalam perancangan maupun renovasi fasilitas produksi. Bagi pengembang kebijakan K3, fokus mitigasi harus digeser pada penguatan barrier fisik guna meminimalisir ketergantungan pada aspek kepatuhan administratif yang fluktuatif. Keterbatasan studi ini mencakup belum adanya pertimbangan terhadap variabel iklim dan topografi lahan secara dinamis. Oleh sebab itu, penelitian mendatang disarankan untuk menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) guna memetakan sebaran energi ledakan pada berbagai skenario lingkungan yang lebih kompleks dan beragam.

5. REFERENSI

- Asih, G. Y., Widhiastuti, H., & Dewi, R. (2018). Stres kerja.
- Azizi, Z., Alipour, P., Raparelli, V., Norris, C. M., & Pilote, L. (2023). The role of sex and gender in hypertension. *Journal of human hypertension*, 37(8), 589-595.
- Fajrin, A. (2023). Hubungan Beban Kerja Fisik Dan Stres Kerja Dengan Tekanan Darah Pada Pekerja Proyek Pembangunan Elevated Railway JGSS 2 Surakarta.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Undangundang No. 36 Tahun 2009 Tentang Kesehatan. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia Indonesia; 2009
- Mahendra, P. G. O., Mauliku, N. E., Suhat, S., Riyanto, A., & Susanto, A. (2026). Faktor Determinan Tekanan Darah pada Pekerja Bagian Produksi PT XY Plant Jakarta. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan*, 7(1), 11-22.
- Marhamah, F. (2025). Hubungan Beban Kerja Dan Stress Kerja Dengan Tekanan Darah Pada Perawat Diruang ICU Rumah Sakit Persahabatan: The Relationship Between Workload and Job Stress with Blood Pressure in Nurses in the ICU at Persahabatan Hospital. *Indonesian Scholar Journal of Nursing and Midwifery Science*, 4(09), 345-355.
- Rahmawati, R., & Kasih, R. P. (2023). Hipertensi Usia Muda. *GALENICAL: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Mahasiswa Malikussaleh*, 2(5), 11.
- Rahmawati, R., & Kasih, R. P. (2023). Hipertensi Usia Muda. *GALENICAL: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Mahasiswa Malikussaleh*, 2(5), 11.
- Rusnoto, R., & Hermawan, H. (2018). Hubungan Stres kerja dengan kejadian hipertensi pada pekerja pabrik di wilayah kerja Puskesmas Kaliwungu. *Jurnal Ilmu Keperawatan dan Kebidanan*, 9(2), 111-117.
- Suling, F. R. (2018). Hipertensi
- Center for Chemical Process Safety (CCPS) (2010) *Guidelines for Quantitative Risk Assessment*. 2nd edn.

- New York: American Institute of Chemical Engineers.
- CSB (2025) *Investigation Report: Explosive Facility Incident at Tennessee*. Washington DC: U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- DDESB (2022) *Technical Paper 16: Methodologies for Calculating Explosive Safety Distances*. Alexandria: Department of Defense Explosives Safety Board.
- Hollnagel, E. (2014) *Safety-II in Practice: Developing the Resilience Potentials*. Abingdon: Routledge.
- Kemenhan RI (2010) *Laporan Investigasi Insiden Fasilitas Produksi Divisi Munisi PT Pindad, Turen*. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.
- Kepala Kepolisian Negara Republik Indonesia (2017) *Peraturan Kepala Kepolisian Negara Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2017 tentang Perizinan, Pengamanan, Pengawasan, dan Pengendalian Bahan Peledak Komersial*. Jakarta: Kepolisian Negara Republik Indonesia.
- National Fire Protection Association (NFPA) (2018) *NFPA 495: Explosive Materials Code*. Quincy: NFPA.
- Standard Australia (2018) *AS 2187.1: Explosives - Storage, Transport and Use - Storage*. Sydney: SAI Global.
- Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O. and Gaston, D. (2002) 'Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(4), pp. 291-303.
- Wardoyo, P.W (2026) 'Analisa Risiko Bahaya Besar Pada Pabrik Perakitan Detonator Dengan Metode Bow-Tie Analysis', *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(10).
- Zulkifli, E. (2010) 'Evaluasi Teknis Pasca Ledakan Fasilitas Produksi Munisi Turen', *Jurnal Pertahanan & Keselamatan*, 4(2), pp. 45-58.