

DESAIN STRUKTUR BANGUNAN TAHAN TERHADAP SERANGAN SENJATA CBR (CHEMICAL, BIOLOGICAL, RADIOLOGICAL)

Ahmad Yani

Prodi Teknik Sipil Pertahanan, Akademi Militer, Jl. Gatot Subroto No. 1 Magelang
Jawa Tengah
yanieyan69@gmail.com

ABSTRAK

Ancaman senjata pemusnah massal berbasis Chemical, Biological, dan Radiological (CBR) telah menjadi isu strategis global yang memengaruhi kebijakan pertahanan dan perlindungan infrastruktur vital. Dalam menghadapi kemungkinan serangan CBR, diperlukan suatu sistem perlindungan pasif yang efektif, khususnya dalam bentuk struktur bangunan yang mampu menahan dan meminimalkan dampak dari infiltrasi agen berbahaya tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan konsepsi struktur bangunan tahan CBR yang mengintegrasikan aspek arsitektural, sistem ventilasi dan filtrasi, material bangunan, serta teknologi deteksi dan dekontaminasi. Pendekatan dilakukan melalui studi literatur standar internasional (NATO ATP-45, WHO Guidelines, FM 3-11), simulasi konseptual desain shelter, dan studi kasus penerapan pada fasilitas militer dan rumah sakit lapangan. Hasilnya menunjukkan bahwa struktur bangunan tahan CBR harus memenuhi prinsip desain berlapis (zoning), sistem udara tertutup dengan tekanan positif, material anti-kontaminasi, serta sistem dekontaminasi aktif. Simulasi skematik dan alur operasional shelter CBR menunjukkan efektivitas perlindungan jika dirancang dengan benar. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa konsepsi struktur bangunan tahan CBR sangat penting untuk dikembangkan di Indonesia, terutama pada fasilitas strategis. Diperlukan dukungan kebijakan, regulasi teknis, serta pelatihan operasional untuk mewujudkan bangunan yang adaptif terhadap ancaman non-konvensional masa depan.

Kata-kunci: biologis; CBR; proteksi pasif; radiologis; senjata kimia; struktur bangunan; ventilasi tertutup

ABSTRACT

The mass destruction weapons threat of Chemical, Biological, and Radiological (CBR) has become a global strategic issue influencing defense policy and the vital infrastructure protection. Facing a potential CBR attack requires an effective passive protection system, particularly in the building structure capable form of withstanding and minimizing the impact of infiltration by these hazardous agents. This study aims to formulate a concept for a CBR-resistant building structure that integrates architectural aspects, ventilation and filtration systems, building materials, and detection and decontamination technologies. The approach was conducted through a literature review of international standards (NATO ATP-45, WHO Guidelines, FM 3-11), conceptual shelter design simulations, and case studies of applications at military facilities and field hospitals. The results indicate that a CBR-resistant building structure must adhere to the layered design (zoning) principles, a closed air system with positive pressure, anti-contamination materials, and an active decontamination system. Schematic simulations and operational flowcharts of CBR shelters demonstrate the protection effectiveness when properly designed. The conclusion is the concept for a CBR-resistant building structure is crucial for development in Indonesia, particularly at strategic facilities. Policy support, technical regulations, and operational training are needed to create buildings that are adaptive to future unconventional threats.

Keywords: biological; building structures; CBR, chemical weapon; closed ventilation; passive protection; radiological

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi persenjataan modern tidak hanya melahirkan senjata konvensional, tetapi juga senjata pemusnah massal yang berbasis CBR (Chemical, Biological, Radiological). Ancaman penggunaan senjata CBR semakin nyata, baik oleh negara maupun kelompok non-negara yang memiliki kepentingan ideologis, politik, maupun ekonomi. Hal ini menuntut adanya sistem pertahanan pasif yang efektif, salah satunya melalui rancang bangun struktur fisik yang mampu bertahan terhadap dampak serangan CBR.

Struktur bangunan tahan CBR memiliki karakteristik khusus, seperti sistem filtrasi udara, ketahanan material terhadap kontaminasi, sistem kedap, serta sistem dekontaminasi internal. Bangunan dengan fitur-fitur ini menjadi vital untuk melindungi personel militer, fasilitas vital nasional, maupun masyarakat sipil dalam situasi darurat CBR. Oleh karena itu, penting untuk merumuskan suatu konsepsi yang komprehensif terkait struktur bangunan tahan CBR, baik dari sisi arsitektural, struktural, maupun sistem proteksi pendukungnya.

Senjata CBR memiliki karakteristik serangan yang tidak langsung namun mematikan, karena bekerja melalui kontaminasi lingkungan dan efek biologis yang sistemik. Serangan kimia dapat mengakibatkan kelumpuhan sistem saraf atau pernapasan, senjata biologis dapat menyebarkan penyakit menular secara masif, dan paparan radiasi dari senjata radiologis menyebabkan kerusakan jaringan dalam jangka panjang.

Dalam konteks pertahanan nasional maupun perlindungan fasilitas vital, penting untuk merancang bangunan yang tidak hanya tahan terhadap ledakan atau serangan fisik, tetapi juga tahan terhadap infiltrasi zat kimia, agen biologis, serta kontaminasi radiasi.

Namun, di Indonesia, konsep struktur tahan CBR masih belum banyak dikembangkan secara serius, baik dalam dunia akademik, militer, maupun sipil. Studi-studi terkait masih terbatas dan implementasi di lapangan umumnya belum sesuai standar internasional seperti NATO ATP-45 atau US Army FM 3-11 Series. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu kajian konseptual yang mengintegrasikan aspek desain bangunan, sistem proteksi, dan adaptasi teknologi dalam satu sistem struktur tahan CBR yang sesuai dengan kondisi dan kebutuhan Indonesia.

2. Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan permasalahan dalam penulisan ini adalah sebagai berikut:

- Apa saja karakteristik teknis dan sistem proteksi yang diperlukan dalam struktur bangunan tahan serangan senjata CBR?
- Bagaimana konsep desain bangunan yang mampu meminimalisir dampak dari senjata kimia, biologis, dan radiologis?
- Apa saja standar internasional dan pendekatan arsitektural yang dapat diadaptasi dalam konteks Indonesia?

e. Bagaimana strategi integrasi antara struktur fisik dan sistem mitigasi (ventilasi, filtrasi, dekontaminasi) dalam membentuk sistem pertahanan pasif terhadap ancaman CBR?

3. Tujuan

Penulisan ini bertujuan untuk:

- a. Mengidentifikasi karakteristik dan ancaman spesifik dari senjata kimia, biologis, dan radiologis terhadap struktur bangunan.
- b. Merumuskan prinsip-prinsip desain struktur bangunan yang dapat meminimalisir dampak serangan CBR.
- c. Mengkaji sistem dan teknologi pelindung (proteksi pasif dan aktif) yang dapat diintegrasikan ke dalam bangunan tahan CBR.
- d. Menyusun suatu konsep struktur bangunan tahan CBR yang adaptif terhadap kondisi geografis, sosial, dan teknis di Indonesia.

METODE

1. Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian kualitatif deskriptif, dengan pendekatan studi literatur dan konseptual rekayasa teknik, yang bertujuan untuk merumuskan rancangan struktur bangunan yang mampu menahan dan meminimalkan dampak serangan senjata CBR.

Penelitian ini mengandalkan data sekunder dari dokumen, jurnal ilmiah, standar internasional, doktrin militer,

dan panduan teknis dari organisasi kesehatan dan pertahanan.

2. Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang digunakan terdiri dari:

a. Studi literatur terhadap dokumen resmi seperti:

- 1) NATO ATP-45 (panduan sistem peringatan CBRN)
- 2) FM 3-11 (doktrin pertahanan CBRN militer AS)
- 3) WHO Guidance untuk proteksi CBR
- 4) Jurnal teknik sipil, arsitektur pertahanan, dan teknik lingkungan

b. Analisis konseptual teknis, meliputi:

- 1) Prinsip desain bangunan tahan CBR (zoning, tekanan positif, ventilasi tertutup)
- 2) Pemilihan material anti-kontaminasi
- 3) Sistem filtrasi dan dekontaminasi
- 4) Tata letak fungsional shelter CBR

c. Simulasi skematik sistem bangunan berbasis model zonasi, alur sirkulasi udara, dan sistem penguncian ruangan untuk kondisi tertutup rapat.

3. Sumber Data

Sumber data utama meliputi:

a. Dokumen dan pedoman teknis:

- 1) NATO ATP-45, FM 3-11, WHO Guidelines
- 2) Manual arsitektur pertahanan

- 3). Panduan sistem HVAC dan ventilasi tertutup
- b. Jurnal ilmiah dan prosiding dalam bidang:
 - 1) Teknik sipil
 - 2) Arsitektur dan perencanaan pertahanan
 - 3) Teknik lingkungan dan kesehatan masyarakat

4. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini adalah:

- a. Kajian dokumen (documentary research)
- b. Penelusuran literatur elektronik dari database jurnal internasional (ScienceDirect, Springer, PubMed, Scopus)
- c. Analisis visual dan fungsional dari gambar teknis dan simulasi konsep bangunan tahan CBR

5. Teknik Analisis Data

Data yang telah dikumpulkan dianalisis secara deskriptif-kualitatif, menggunakan:

- a. Analisis isi (content analysis) terhadap pedoman teknis dan standar internasional
- b. Sintesis informasi teknis, untuk menyusun model konseptual struktur tahan CBR
- c. Analisis komparatif, antara beberapa negara dalam implementasi shelter CBR
- d. Modeling konseptual, melalui skema denah, sistem ventilasi, dan kontrol zona

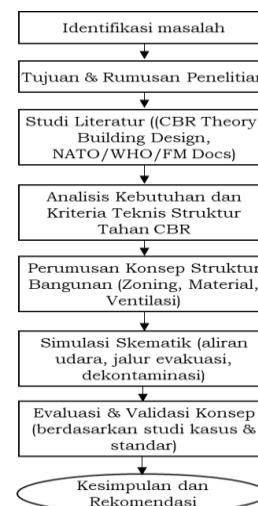
6. Validitas Data

Untuk menjamin validitas, penelitian ini menggunakan triangulasi sumber, yaitu:

- a. Menggunakan lebih dari satu sumber literatur untuk setiap konsep utama
- b. Mengonfirmasi konsep dengan data empiris dari studi kasus
- c. Mengkaji konsistensi antar pedoman internasional (militer dan sipil)

7. Alur Penelitian

Gambar 1 yakni diagram alur penelitian ini menggambarkan langkah-langkah yang sistematis dalam merancang konsepsi struktur bangunan tahan CBR.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian
(Sumber: Data Primer, 2025)

Tabel 1. Instrumen Pengumpulan Data

Jenis Data	Sumber	Instrumen
Standar Internasional	NATO ATP-45, FM 3-11, WHO, ISO 22300	Dokumen, manual, buku panduan
Spesifikasi teknis bangunan	Jurnal teknik sipil dan arsitektur militer	Artikel ilmiah, blueprint shelter, gambar teknis
Studi Kasus Shelter CBR	Negara: Israel, Jerman, Korea Selatan	Laporan proyek, dokumen kementerian pertahanan
Parameter teknis sistem HVAC	Manual sistem ventilasi tahan CBR	Datasheet teknis, diagram sistem tekanan udara

(Sumber: Data Primer, 2025)

8. Instrumen Pengumpulan Data

Untuk mendukung pengumpulan informasi dan analisis, digunakan instrumen pada **Tabel 1**.

PEMBAHASAN

1. Karakteristik teknis dan sistem proteksi yang diperlukan dalam struktur bangunan tahan serangan senjata CBR.

Karakteristik teknis dan sistem proteksi yang harus dimiliki oleh suatu bangunan menjadi sangat penting untuk menciptakan struktur yang tangguh, aman, dan mampu menjaga keberlanjutan fungsi vital ketika menghadapi serangan CBR, diantaranya adalah :

- a. Struktur dan Material
 - 1) Struktur tertutup rapat (airtight) untuk mencegah masuknya agen CBR dari udara luar.
 - 2) Bahan bangunan menggunakan material tahan korosi, kedap air dan udara, serta mudah dibersihkan dari kontaminan (stainless steel, beton berlapis epoksi, atau cat anti-mikroba).
 - 3) Konstruksi dinding dan atap diperkuat terhadap gelombang kejut (blast resistant) dari ledakan konvensional atau bom CBR.
 - 4) Sistem pintu dan jendela bersegel ganda (airlock) untuk mencegah kebocoran saat personel keluar-masuk.
- b. Zonasi dan Ruang Teknis
 - 1) Zona dekontaminasi (decon area) di pintu masuk utama.
 - 2) Zona aman (clean zone) di bagian terdalam, tempat personel beraktivitas.
 - 3) Zona transisi antara area luar dan dalam, berfungsi sebagai penghalang kontaminasi.
 - 4) Ruang filter dan mekanik khusus untuk sistem ventilasi dan penyaringan udara.
- c. Desain Tekanan dan Sirkulasi Udara
 - 1) Tekanan positif di dalam ruangan utama agar udara dari luar tidak masuk saat terjadi kebocoran.
 - 2) Sistem HVAC tertutup dengan kontrol otomatis untuk menjaga suhu, tekanan, dan kelembapan.
- d. Sistem Proteksi Kimia (Chemical Protection)
 - 1) Filter NBC/CBRN grade dengan lapisan HEPA + karbon aktif untuk menyerap gas beracun dan partikel kimia.
 - 2) Sistem deteksi gas beracun (misal: sarin, klorin, VX, mustard gas) dengan sensor otomatis.
 - 3) Lapisan permukaan anti-serapan kimia agar mudah didekontaminasi.
- e. Sistem Proteksi Biologis
 - 1) Filter HEPA kelas tinggi (99.97%) untuk

- menyaring mikroorganisme dan spora.
- 2) UV germicidal lamps atau ozon sterilizer untuk menonaktifkan agen biologis di udara.
- 3) Ruang dekontaminasi personel dan peralatan dengan larutan disinfektan.
- f. Sistem Proteksi Radiologis
 - 1) Perisai radiasi (radiation shielding) dari beton tebal, timbal, atau baja pada area tertentu.
 - 2) Sensor radiasi (Geiger counter atau dosimeter area) untuk deteksi paparan.
 - 3) Ruang aman (shelter room) dengan lapisan perlindungan tambahan dan suplai udara mandiri.
- g. Sistem Dekontaminasi
 - 1) Ruang dekontaminasi bertingkat:
 - a) Level 1: Pembersihan kasar (air bertekanan).
 - b) Level 2: Pencucian dengan agen kimia netral.
 - c) Level 3: Pengeringan dan sterilisasi.
 - 2) Drainase khusus limbah CBR, disalurkan ke unit pengolah limbah berfilter karbon/biologis.
- h. Sistem Energi dan Komunikasi
 - 1) Sumber daya listrik cadangan (genset & UPS) agar sistem tetap berfungsi saat darurat.

- 2) Jaringan komunikasi tertutup (secure communication) yang tahan gangguan elektromagnetik.

i. Sistem Kendali dan Monitoring

- 1) CBR Detection & Monitoring System: sensor terintegrasi untuk deteksi dini agen kimia, biologi, dan radiasi.
- 2) Automatic Sealing System: menutup seluruh ventilasi otomatis bila deteksi bahaya muncul.
- 3) Command and Control Center: pusat kendali operasi dan evakuasi.

2. Konsepsi Struktur Bangunan Tahan Serangan Senjata CBR

- a. Pendekatan Konseptual
- Konsepsi struktur bangunan tahan CBR merupakan integrasi antara ketahanan fisik (struktur) dan ketahanan fungsional (sistem proteksi) terhadap ancaman senjat kimia, biologis, dan radiologis. Bangunan dirancang tidak hanya untuk menahan serangan fisik, tetapi juga untuk meminimalkan infiltrasi, kontaminasi, dan penyebaran agen CBR di dalam struktur.

Tujuan utama: Melindungi jiwa, menjaga fungsi fasilitas vital, dan meminimalisir dampak lanjutan dari serangan CBR.

b. Prinsip Desain Konseptual

- 1) Kedap dan Terisolasi (Airtight & Isolated)

- a) Struktur harus memiliki tingkat kedap udara tinggi.
- b) Sambungan antar elemen struktur menggunakan sealant kimia tahan tekanan.
- c) Penggunaan blast-proof door dan hermetic seal window.
- 2) Zonasi Fungsional Berlapis (Layered Defense Zone)
 - a) Zona A: Area luar (kontaminasi bebas)
 - b) Zona B: Area dekontaminasi (ruang bilas, UV chamber)
 - c) Zona C: Zona transisi (dengan kontrol tekanan udara)
 - d) Zona D: Zona steril (ruang utama operasional)
- 3) Sirkulasi Udara Terkontrol
 - a) Desain ducting tertutup dengan sistem filtrasi HEPA + karbon aktif.
 - b) Positive pressure system untuk zona steril.
- 4) Sistem Deteksi dan Respons Otomatis
 - a) Sensor kimia (detektor gas), biologis (partikulat udara), dan radiologis (Geiger counter) di titik-titik strategis.
 - b) Alarm otomatis dan isolasi otomatis saat deteksi paparan.
- 5) Dekontaminasi dan Pengendalian Limbah

- a) Jalur khusus pembuangan limbah kontaminan.
- b) Drainase tertutup dengan sistem netralisasi kimia atau disinfektan.

c. Komponen Utama dalam Struktur Bangunan Tahan CBR

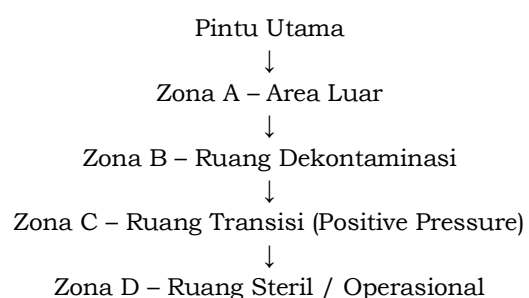
Pada **Tabel 2** ditampilkan deskripsi komponen utama dalam struktur bangunan tahan CBR, fungsi dan spesifikasi.

Tabel 2. Komponen Utama dalam Struktur Bangunan Tahan CBR

Komponen	Fungsi	Spesifikasi
Dinding dan Struktur	Menahan kontaminasi & tekanan luar	Beton bertulang + pelapis epoxy
Ventilasi dan Filtrasi	Menyaring udara masuk dan keluar	HEPA filter, karbon aktif, overpressure system
Dekontaminasi	Membersihkan personel/peralatan sebelum masuk	Shower kimia, bilik UV, jalur drainase tertutup
Sensor Deteksi CBR	Deteksi dini kontaminan	Sensor gas, biologis, radiasi
Zona Tekanan Positif	Mencegah udara luar masuk	Sistem HVAC tertutup bertekanan lebih tinggi
Material Interior	Tidak menyerap agen CBR	Logam tahan kimia, PVC non-porous, stainless steel

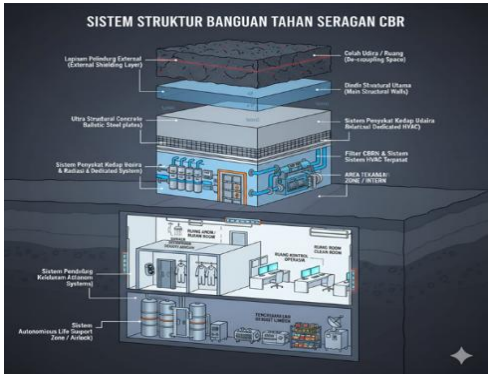
(Sumber: Data Primer, 2025)

d. Model Tata Letak Bangunan Tahan CBR (Contoh Skematik)



Pada **Gambar 2** ditampilkan Setiap zona dipisahkan oleh

pintu kedap udara, dan disertai dengan alarm serta kontrol tekanan otomatis.



Gambar 2. Sistem Struktur Bangunan Tahan Senjata CBR
(Sumber: Data Sekunder, 2025)

e. Adaptasi Struktur terhadap Iklim dan Lingkungan Indonesia

- 1) Ventilasi dengan pendingin pasif untuk daerah panas dan lembap.
- 2) Material lokal yang dimodifikasi dengan pelapis tahan kimia, misalnya campuran semen dengan aditif silika aktif.
- 3) Desain tahan gempa, khususnya untuk kawasan rawan bencana seperti Jawa dan Sumatera.
- 4) Penempatan semi-bawah tanah (semi-underground) untuk meminimalkan paparan langsung dan tingkatkan stabilitas termal.

f. Simulasi Aplikasi:

Konsep Shelter Taktis CBR untuk Markas Militer. Kebutuhan:

- 1) Luas: ±100 m²
- 2) Kapasitas: 20 personel
- 3) Daya dukung: 3 hari isolasi mandiri

- 4) Sistem: self-contained HVAC, 2 ruang dekontaminasi, 1 ruang steril, backup genset .

Kemudian untuk desain ditampilkan sebagai berikut:

- 1) Struktur prefab beton + baja ringan modular
- 2) Posisi terintegrasi dengan infrastruktur markas
- 3) Akses tunggal yang dilindungi
- 4) Satu jalur keluar darurat dengan sistem penutup otomatis

3. Standar internasional dan pendekatan arsitektural yang dapat diadaptasi dalam konteks Indonesia

a. Standar Internasional Amerika Serikat (Militer & Sipil)
Aspek tinjauan CBR dihadapkan standar amerika serikat dan penerapan di Indonesia dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Aspek terhadap CBR, Standar Amerika Serikat dan Penerapannya

Aspek	Standar	Penerapan di Indonesia
CBR Protection Design	UFC 4-024-01 (Design Guidance for CBR Protection in Buildings)	Pedoman utama sistem proteksi udara, tekanan positif, dan layout zona dekontaminasi. Bisa diadaptasi untukfasilitas militer dan sipil vital (RS, lab, command center).
Blast & Structural Hardening	UFC 3-340-02 (Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions)	Relevan untuk memperkuat dinding dan atap terhadap overpressure dan shockwave akibat ledakan CBR.
HVAC & Filtration	ASHRAE Standard 62.1, 52.2, 170	Standar ventilasi dan efisiensi filter udara. H13-H14 HEPA sesuai ISO/EN dapat diadopsi untuk ruangbersih dan shelter.
Building Safety	NFPA 101 (Life Safety Code)	Mengatur evakuasi dan kontrol asap, penting untuk integrasi sistem CBR dengan keselamatan kebakaran.

(Sumber: Data Primer, 2025)

- b. Standar Eropa
Aspek tinjauan CBR dihadapkan standar eropa dan adaptasi di Indonesia dilihat pada **Tabel 4.**

Tabel 4. Aspek terhadap CBR, Standar Eropa dan Adaptasi

Aspek	Standar	Catatan Adaptasi
Filtrasi & Kebersihan Udara	EN 1822 / ISO 29463	Pengujian dan klasifikasi efisiensi HEPA/ULPA filter - bisa digunakan untuk pengadaan lokal HVAC & cleanroom.
Desain Ruang Bersih	ISO 14644 series	Standar desain, klasifikasi, dan pengujian kebersihan udara -berguna untuk laboratorium atau shelter kedap udara.
Konstruksi Bangunan Tahan Ledakan	EN 13123-1 & 2	Panduan pemilihan material dan uji kaca/pintu yang tahan overpressure akibat ledakan.

(Sumber: Data Primer, 2025)

- c. Pendekatan Arsitektural Adaptif di Indonesia

Pada **Tabel 5**, Karakter iklim Indonesia (lembap, panas, curah hujan tinggi) menuntut adaptasi desain CBR tanpa mengorbankan kenyamanan termal.

Tabel 5. Komponen Arsitektural Adaptif desain CBR

Komponen	Pendekatan Adaptif
Ventilasi	Sistem ventilasi hybrid: <i>normal mode</i> (alami & mekanis) + <i>emergency mode</i> (tertutup, tekanan positif, filter HEPA).
Bahan Bangunan	Gunakan beton bertulang berlapis epoksi, baja galvanis, atau panel GRC yang tahan lembap, mudah dekontaminasi, dan tidak berpori.
Atap dan Dinding	Bentuk atap miring (shed/limasan) untuk drainase cepat; gunakan lapisanpelindung dari radiasi UV dan agen kimia (coating polyurethane).
Pintu & Jendela	Pintu kedap udara (air-tight doors) dengan <i>double gasket</i> atau <i>airlock chamber</i> . Bisa produksi lokal dengan standar EN 13123 adaptif.
Ruang Dekontaminasi	Didesain semi-terbuka, memanfaatkan air tekanan tinggi dan drainase

(Sumber: Data Primer, 2025)

- d. Prinsip Desain Adaptif Lokal

- 1) Modularitas → Bangunan bisa diubah ke mode perlindungan hanya di zona tertentu (hemat energi & biaya).
- 2) Redundansi alami → Memanfaatkan sumber energi lokal (panel surya, genset biodiesel).
- 3) Dekontaminasi berbasis air hujan → Penampungan air hujan untuk sistem cuci-decon (setelah disterilkan).
- 4) Integrasi dengan vegetasi pelindung → Sabuk hijau (barrier tanaman lebat) dapat mengurangi dispersi aerosol kimia ringan.
- 5) Pemanfaatan material lokal → Bata ringan & beton pracetak dengan pelapis kedap udara, agar biaya tetap rendah tapi tahan lama.

- e. Regulasi Nasional yang dapat Dihubungkan

- 1) SNI 03-6572-2001 — Tata cara perancangan sistem ventilasi dan AC pada bangunan.
- 2) SNI 1727:2020 — Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung.
- 3) Peraturan Kementerian PUPR No. 16/2021 — Standar Teknis Bangunan Gedung (bisa disesuaikan dengan fungsi militer/strategis).

- 4) Peraturan Kepala BNPB & Kemenhan — Untuk pedoman tanggap darurat dan mitigasi serangan kimia-biologi.

4. Strategi integrasi antara struktur fisik dan sistem mitigasi (ventilasi, filtrasi, dekontaminasi) dalam membentuk sistem pertahanan pasif terhadap ancaman CBR.

Dalam rangka kerja praktis, teknis, dan langsung dapat dipakai oleh arsitek/insinyur/operasional dengan prinsip umum sampai parameter desain, urutan implementasi, dan pengujian menjadi blok langkah yang bisa diikuti saat merancang baru atau retrofit bangunan di Indonesia secara prinsip lapis-lapis sebagai bangun proteksi kombinasi envelope fisik yang kedap & tahan, kontrol aliran udara & filtrasi, alur dekontaminasi, dan deteksi + otomasi. Semua lapisan harus saling mendukung - bila satu lapis gagal, lapis lain tetap melindungi. Ini adalah prinsip yang dianjurkan oleh pedoman CBR seperti UFC 4-024-01 dan NIOSH.

a. Envelope fisik — dasar pertahanan pasif

- 1) Kedap udara (airtight envelope): segel semua penetrasi (pipa, kabel), gunakan pintu ber-airlock dan gasket ganda pada bukaan. Lakukan pengujian kebocoran (fan pressurization / blower door) (info.ornl.gov).
- 2) Material permukaan non-porous: epoxy-coated concrete, stainless, cat

tahan kimia sehingga mudah didekontaminasi (GOV.UK).

- 3) Proteksi struktur: untuk ancaman fisik/ledakan, integrasikan penguatan (blast hardening) bila relevan (Humanitarian Library).

b. Strategi ventilasi & filtrasi terintegrasi

- 1) Mode operasi HVAC ganda:

- a) Normal mode - operasi efisiensi energi (campuran udara luar/recirculation).
- b) Shelter/Isolation mode - seluruh outside air ditutup; gunakan recirculation lewat HEPA + adsorben karbon; pertahankan positive pressure di zona bersih untuk mencegah infiltrasi. Panduan UFC & NIOSH menjelaskan skema ini (WBDG+1).

- 2) Filtrasi berlapis (lokasi & urutan): pre-filter → medium filter → HEPA H13/H14 terminal (EN 1822 /ISO 29463) untuk partikel/biologi → karbon aktif/impregnated carbon untuk gas kimia. Pilih apakah filtrasi utama dilakukan di intake (external filtration) atau secara internal pada protected zone (internal filtration) berdasarkan biaya & tingkat proteksi yang dibutuhkan (www.cedengineering.com)

- 3) Parameter desain yang umum dipakai:
 - a) HEPA H13/H14 untuk terminal (WBDG).
 - b) ACH desain ruang proteksi: umumnya 6–12 ACH (sesuaikan dengan fungsi ruang) (info.ornl.gov).
 - c) Diferensial tekanan antar zona: target tipikal ~10–15 Pa antara buffer dan clean zone; airlock diatur 5–10 Pa tiap sisi (UFC/NIOSH) (WBDG).
- 4) Redundansi & daya: unit blower N+1, UPS + genset agar HVAC/filtrasi berfungsi saat gangguan (WBDG).
- c. Alur dekontaminasi sebagai bagian dari tata ruang
 - 1) Linear flow: luar → decon entry (airlock) → buffer (pemeriksaan) → clean zone. Desain pasokan air, pemisahan aliran kotoran, dan drainase tertutup menuju unit pengolahan limbah (GOV.UK).
 - 2) Ruang & peralatan decon: shower tekanan, area pembersihan peralatan, tempat penyimpanan PPE terkontaminasi. Pastikan area decon mempunyai isolasi ventilasi sendiri dan akses untuk penanganan limbah (FEMA).
- d. Deteksi, otomasi, & prosedur respon otomatis
 - 1) Sensor terintegrasi (gas detectors, rad monitors, bioaerosol jika tersedia) konek ke BMS/Command Center. Saat deteksi: otomatis seal, tutup intake, alih HVAC ke shelter mode, aktifkan alarm & notifikasi. Pedoman DHS/FEMA/DoD merekomendasikan integrasi ini.
 - 2) Interlock & fail-safe: desain interlock yang memprioritaskan keselamatan (mis. penutupan otomatis bila ambang terlampaui), plus opsi manual untuk pemeliharaan (NDIA Proceedings).
- e. Integrasi struktur-MEP (praktik desain)
 - 1) Letak ruang teknis HVAC & filter: taruh AHU/filtration plant di lokasi terlindung (atap atau ruang mesin terisolasi) dengan akses servis tanpa lewat zona bersih (WBDG).
 - 2) Penempatan intake: tempatkan intake udara jauh dari area publik/permukaan rendah (tinggikan intake), pertimbangkan wind/gelembung pembuangan untuk mengurangi kemungkinan kontaminan masuk (www.cedengineering.com).
 - 3) Routing duct & sealing: semua duct yang melayani zona proteksi harus disegel, dengan sensor differential pressure di loop untuk monitoring kebocoran (info.ornl.gov).

f. Commissioning, pengujian & maintenance (kunci keberlanjutan)

1) Uji integritas HEPA (DOP / aerosol challenge per EN 1822 / ISO 29463) saat commissioning dan periode berkala (WBDG).

2) Fan pressurization test untuk memverifikasi airtightness dan diferensial tekanan antar zona (info.ornl.gov).

3) Kalibrasi sensor & simulasi insiden: tes trigger otomatis, latihan shelter-in-place dan decon min. 2x/tahun (NDIA Proceedings).

4) Jadwal penggantian filter berdasarkan ΔP /monitoring kualitas udara; simpan stok filter & karbon aktif pengganti. (www.cedengineering.com).

g. Strategi Implementasi Konsep di Indonesia

Tabel 6. Pendekatan Arsitektural Adaptif di Indonesia

Strategi	Penjelasan
Prioritas Lokasi	Fasilitas militer, rumah sakit rujukan, kantor pusat pemerintahan
Skalabilitas	Dimulai dari bangunan vital, lalu ke sektor publik sensitif
Kolaborasi	Melibatkan TNI, BNPB, Kementerian Kesehatan, Litbang PU
Pelatihan Khusus	Pengoperasian shelter, prosedur evakuasi, dan dekontaminasi
Anggaran Bertahap	Dibangun melalui skema multi-tahun dan anggaran pertahanan nasional

(Sumber: Data Primer, 2025)

Tabel 6 dimana Studi kasus dan simulasi yang disajikan menggambarkan bahwa penerapan struktur bangunan

tahan CBR adalah realistis dan aplikatif, meskipun memerlukan investasi awal, pelatihan, dan dukungan kebijakan. Konsepsi ini dapat menjadi solusi pertahanan pasif jangka panjang dalam menghadapi ancaman non- konvensional.

KESIMPULAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

a. Ancaman senjata CBR (Chemical, Biological, Radiological) merupakan jenis ancaman modern yang bersifat tidak kasat mata, sulit dideteksi secara langsung, dan memiliki dampak sistemik terhadap manusia, lingkungan, dan infrastruktur.

b. Struktur bangunan tahan CBR harus memenuhi prinsip dasar perlindungan pasif dan aktif, dengan penekanan pada:

1) Kedap udara dan tekanan positif untuk mencegah infiltrasi.

2) Penggunaan material yang tahan terhadap zat kimia, tidak menyerap kontaminan.

3) Sistem ventilasi tertutup dan filtrasi berlapis (HEPA dan karbon aktif).

4) Zona dekontaminasi dan isolasi internal yang strategis.

5) Sistem deteksi otomatis terhadap agen kimia, biologis, dan radiasi.

c. Konsepsi bangunan tahan CBR dapat diimplementasikan dalam berbagai skala:

- 1) Shelter militer
- 2) Rumah sakit lapangan
- 3) Fasilitas vital pemerintahan dan publik dengan desain modular, material lokal yang dimodifikasi, dan teknologi sistem tertutup yang disesuaikan dengan kondisi tropis Indonesia.
- d. Simulasi aliran udara dan kontrol tekanan menunjukkan efektivitas signifikan dalam mencegah penyebaran agen CBR antar zona dalam bangunan.
- e. Pengembangan struktur tahan CBR memerlukan dukungan kebijakan, regulasi teknis, kolaborasi multidisiplin (arsitektur, teknik sipil, kesehatan, militer), serta peningkatan kapasitas SDM melalui pelatihan.

b. Saran

Untuk mendukung implementasi dan pengembangan bangunan tahan CBR di Indonesia, penulis merekomendasikan hal-hal berikut:

- a. Pemerintah dan TNI perlu mulai mengembangkan standar nasional terkait desain struktur bangunan tahan CBR sebagai bagian dari sistem pertahanan pasif nasional.
- b. Simulasi teknis (CFD, deteksi agen, dan sirkulasi udara) sebaiknya menjadi bagian dari tahap awal desain bangunan penting, khususnya di lokasi yang berisiko tinggi.
- c. Pembangunan shelter CBR permanen dan semi-permanen perlu diprioritaskan di:
 - 1) Markas komando militer
 - 2) RS rujukan penanggulangan wabah/CBRN

- 3) Kantor pemerintah strategis
- d. Pelatihan personel operasional shelter CBR harus dilaksanakan secara berkala, termasuk latihan evakuasi dan dekontaminasi.
- e. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk:
 - 1) Pengembangan material bangunan tahan CBR berbasis lokal
 - 2) Optimalisasi sistem filtrasi udara untuk iklim tropis
 - 3) Integrasi sistem CBR dengan sistem smart-building dan sensor otomatis

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh pihak atas dukungan dalam penyusunan penelitian ini, khususnya kepada Akademi Militer sehingga dapat terlaksana tepat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2019). *Pedoman penanggulangan bencana non-alam akibat bahan kimia, biologi, dan radioaktif*. Jakarta: BNPB.
- Department of the Army. (2011). *FM 3-11: Multiservice doctrine for chemical, biological, radiological, and nuclear operations*. Washington, DC: U.S. Department of the Army.
- Department of the Army. (2011). *Protection of buildings against chemical, biological, and radiological (CBR) threats (TM 5-855-1)*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- Federal Emergency Management Agency. (2003). *FEMA 427: Primer*

- for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks.* Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security.
- FM 3-11 Series. (2003–2009). *U.S. Army field manuals on CBRN operations.* Washington, DC: U.S. Department of the Army.
- Fattah, A. (2020). Desain shelter tahan CBR: Studi literatur dan simulasi. *Jurnal Pertahanan Nasional, X(X)*, xx–xx.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Protection against chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) threats.* Vienna: IAEA Safety Standards Series.
- Ismail, S. (2019). Design consideration of CBRN-safe shelter. *Journal of Defense Infrastructure Engineering, 7(2)*, 45–55.
- Kim, H., & Lee, S. (2021). Urban shelter designs against CBR threats. *International Journal of Civil & Military Resilience, 10(1)*, 17–29.
- Ministry of Defence. (2015). *CBRN protection and hazard management: Defence standard 00-72.* London: UK Ministry of Defence.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2009). *Guidelines for protecting building environments from airborne chemical, biological, or radiological attacks.* Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services.
- NATO. (2015a). *ATP-45(D): Warning and reporting and hazard prediction of chemical, biological, radiological and nuclear incidents.* Brussels: NATO Standardization Office.
- NATO. (2015b). *ATP-45: NATO handbook on sampling and identification of biological, chemical and radiological agents.* Brussels: NATO Standardization Office.
- Sugiharto, A. (2018). Perlindungan bangunan dari ancaman radiasi dan kontaminasi kimia. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil* (pp. xx–xx).
- World Health Organization. (2004). *Public health response to biological and chemical weapons: WHO guidance.* Geneva: WHO.