

ANALISIS RESPON DINAMIK DAN KINERJA STRUKTUR BAJA KOMPOSIT TERHADAP BEBAN LEDAKAN UDARA (*FREE-AIR BURST*)

*Muhammad Aidhil Dzikri¹, Nurti Kusuma Anggraini¹, Endah Kanti Pangestuti¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Kota Semarang, Indonesia

*)Penulis korespondensi: Muhammad Aidhil Dzikri (muhammaidhildzikri@students.unnes.ac.id)

Received: 06 Mei 2026 Revised: 18 Juni 2026 Accepted: 21 Juni 2026

Abstract— The security of strategic infrastructure from the threat of explosive drones is a critical focus of modern engineering. This study aims to elicit the dynamic response of composite steel beams (BA1 and BII) to exposure to a Free-Air Burst with a load variation of 0.5 to 10 kg TNT equivalent at a perpendicular distance of 3 meters. Numerical simulations based on finite element execution using ETABS v22.0.0 software, supported by Friedlander shock wave calculations and Dynamic Increase Factor (DIF). The analysis results show that at low-scale load exposure (0.5–1 kg TNT), the structure operates intact in the elastic phase with a cross-sectional stress ratio below the safe limit of 1.0. In contrast, extreme loading (5–10 kg TNT) triggers a drastic transition to the elasto-plastic phase. The dynamic deflection in the child beam (BA1) soars to 51.73 mm, exceeding the allowable limit of 30.02 mm. Although statistically considered a failure, the ductility of the composite material is able to efficiently absorb the blast energy without triggering damage. This local sacrifice mechanism successfully kept the support rotation beams BA1 and BII below the 3° limit. In conclusion, the composite nonlinear response is proven to prevent progressive collapse of the building while fulfilling the extreme protective philosophy oriented towards the safety of occupants' lives.

Keywords — Composite Beams; Blast Load; Free Air Burst; Support Rotation.

Abstrak— Keamanan infrastruktur strategis dari ancaman pesawat nirawak berpeledak menjadi fokus kritis rekayasa modern. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respon dinamik balok baja komposit (BA1 dan BII) terhadap paparan ledakan udara bebas dengan variasi muatan 0,5 hingga 10 kg ekuivalen TNT pada jarak tegak lurus 3 meter. Simulasi numerik berbasis elemen hingga dieksekusi menggunakan perangkat lunak ETABS v22.0.0, didukung perhitungan gelombang kejut Friedlander serta Faktor Peningkatan Dinamis (DIF). Hasil analisis menunjukkan bahwa pada paparan beban skala rendah (0,5–1 kg TNT), struktur beroperasi utuh di fase elastis linier dengan rasio tegangan penampang di bawah batas aman 1,0. Sebaliknya, pembebanan ekstrem (5–10 kg TNT) memicu transisi drastis menuju fase elasto-plastis. Lendutan dinamis pada balok anak (BA1) melonjak mencapai 51,73 mm, melampaui batas izin 30,02 mm. Meskipun secara statis dinilai gagal, daktilitas material komposit secara efisien mampu menyerap energi ledakan tanpa memicu patah getas. Mekanisme pengorbanan lokal ini sukses menjaga rotasi sudut tumpuan balok BA1 dan BII tetap di bawah batas 3°. Kesimpulannya, respon nonlinear komposit terbukti mencegah keruntuhan progresif gedung sekaligus memenuhi filosofi pelindung ekstrem berorientasi keselamatan nyawa penghuni.

Kata kunci — Balok Komposit; Beban Ledakan; Ledakan Udara; Rotasi Tumpuan.

1. PENDAHULUAN

Struktur bangunan pada fasilitas strategis yang berisiko menghadapi ancaman keamanan tingkat tinggi harus direncanakan dengan mempertimbangkan respons dinamik struktur secara cermat untuk meminimalkan risiko kerusakan dan kegagalan struktural. Anas *et al.* (2023) menegaskan bahwa ketahanan fasilitas vital tidak lagi cukup hanya mengandalkan beban nominal, melainkan harus siap memitigasi dampak beban impulsif ekstrem. Meningkatnya kemudahan akses terhadap teknologi penerbangan sederhana, seperti penggunaan drone yang membawa bahan peledak, menimbulkan risiko serius berupa paparan ledakan di udara (*Free-Air Burst*), baik akibat sabotase yang direncanakan maupun kecelakaan industri yang terjadi pada fasilitas penting (Catovic & Kljuno, 2021; Kilicer, 2025). Fenomena ledakan ini memiliki karakteristik yang berbeda secara fundamental dari beban gempa konvensional yang bersifat siklik. Energi ledakan udara dilepaskan secara masif dalam skala milidetik, sehingga menciptakan tekanan refleksi puncak yang sangat destruktif. Fu *et al.* (2021) dalam

studinya menjelaskan bahwa rentang waktu pembebanan yang teramat singkat ini memaksa material struktur bekerja di bawah laju regangan yang sangat tinggi (*High Strain Rate*), sehingga kapasitas bertahannya tidak lagi menjadi fungsi kaku penampang statis semata, melainkan hasil interaksi antara massa daktilitas material dan parameter jarak ledak (*standoff distance*).

Penelitian mengenai struktur tahan ledak umumnya masih menjadikan teori respons *Single Degree of Freedom* (SDOF) dan pedoman teknis UFC 3-340-02 sebagai landasan analisis dalam upaya memitigasi dampak deformasi. Melalui pendekatan tersebut, beberapa penelitian menunjukkan bahwa perbedaan jarak aman ledakan dan variasi berat ekuivalen bahan peledak terbukti meningkatkan risiko deformasi seketika dan memicu fenomena keruntuhan progresif (*Progressive Collapse*) (Anas & Alam, 2021; Malathy *et al.*, 2024). Untuk memitigasi risiko tersebut pada dimensi bentang lebar, sinergi antara kuat tarik baja struktural dan kuat tekan pelat beton menjadi pilihan utama. Hal tersebut diperkuat studi terbaru oleh Suwandy *et al.* (2023) yang menekankan bahwa penggunaan baja dan beton secara bersamaan mampu lebih efektif dalam menyerap dan meredam energi dibandingkan beton bertulang konvensional. Namun, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada elemen vertikal seperti kolom beton atau bangunan sipil komersial umum, sedangkan kajian khusus mengenai transisi elasto-plastis pada balok atap komposit baja masih sangat terbatas (Marpahiko *et al.*, 2021; Satiawan, 2021).

Untuk mengisi kesenjangan penelitian tersebut, maka dilakukan penelitian mengenai respons balok baja komposit akibat beban ledak ekuivalen TNT sebesar 0,5–10 kg pada jarak 3 meter dari fase elastis hingga fase elasto-plastis. Penelitian ini menggunakan Faktor Peningkatan Dinamis (DIF) untuk mengidentifikasi ambang leleh aktual material yang terjadi akibat pengaruh laju regangan tinggi selama peristiwa ledakan (Lai *et al.*, 2024; Osman & Mourad, 2021). Parameter yang ditinjau meliputi rasio tegangan geser dan momen lentur, lendutan, serta batas rotasi tumpuan. Kajian ini dirancang untuk mengonfirmasi bahwa mekanisme deformasi berlebih dapat berfungsi sebagai perlindungan pasif terakhir, sehingga pendekatan desain pelindung yang berfokus pada keselamatan penghuni dapat diwujudkan secara efektif dan terukur.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metodologi kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik dan analisis deskriptif untuk mereplikasi fenomena ledakan ke dalam model matematis tanpa uji destruktif berskala penuh. Pendekatan ini termasuk eksperimen semu, mengingat pengujian ledakan di lapangan berisiko tinggi dan memerlukan biaya besar. Oleh karena itu, metode elemen hingga (*Finite Element Method*) digunakan sebagai instrumen utama untuk menganalisis respons struktur terhadap beban ekstrem, khususnya bagaimana gelombang kejut yang merambat melalui udara memberikan tekanan impulsif pada permukaan bangunan. Simulasi dilakukan dengan ETABS v22.0.0 berbasis analisis riwayat waktu (*Time-History*), sehingga perilaku struktur dapat diamati dari fase elastis hingga elasto-plastis. Pendekatan ini sejalan dengan konsep penelitian eksperimen yang bertujuan mengkaji pengaruh perlakuan yang tidak terjadi secara alami (Sugiyono, 2019).

2.2 Metode Analisis

Berdasarkan data yang telah diperoleh, prosedur analisis yang sistematis diterapkan untuk mengevaluasi hasil penelitian secara komprehensif. Tahap awal difokuskan pada pemodelan struktur tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS v22.0.0. Setelah model dasar terbangun, perhitungan parameter beban ledakan udara (*free air-burst*) dilakukan melalui pendekatan empiris Kingery-Bulmash. Perhitungan ini bertujuan untuk mengonversi skenario variasi muatan bahan peledak menjadi fungsi pembebanan riwayat waktu (*time-history*). Dalam tahapan simulasi dinamis, fenomena rambatan gelombang kejut ledakan direduksi menjadi grafik fungsi beban dinamis terhadap waktu (*load-time function*) menggunakan metode empiris modifikasi Friedlander, yang kemudian diaplikasikan secara langsung pada penampang elemen balok baja komposit di area pelat atap. Melalui kalkulasi ini, durasi fase tekanan dorong positif dan tekanan puncak kedatangan gelombang kejut dapat diaplikasikan secara akurat pada model struktur. Penggunaan rumusan komprehensif ini memungkinkan analisis perpindahan mekanis dan tegangan struktur secara mendalam terhadap data riwayat waktu tekanan ledakan yang sesungguhnya (Hussein & Heyliger, 2025).

Setelah simulasi, parameter penting berupa gaya dalam (momen dan geser) serta deformasi (lendutan) diambil untuk dibandingkan dengan kapasitas nominal yang telah dikalikan faktor material dinamis (DIF) dan batas rotasi tumpuan. Fenomena ledakan menyebabkan material mengalami regangan sangat cepat (*high strain rate*), sehingga kekuatan leleh yang diperoleh dari kondisi statis menjadi tidak representatif. Oleh karena itu, analisis ini menerapkan Faktor Peningkatan Dinamis (DIF) sesuai pedoman UFC 3-340-02 (2008) untuk memperoleh hasil yang lebih akurat. Hasil evaluasi tersebut kemudian digunakan untuk mengidentifikasi batas kekuatan elemen, dengan merujuk pada standar ASCE 59-11 dan UFC 3-340-02.

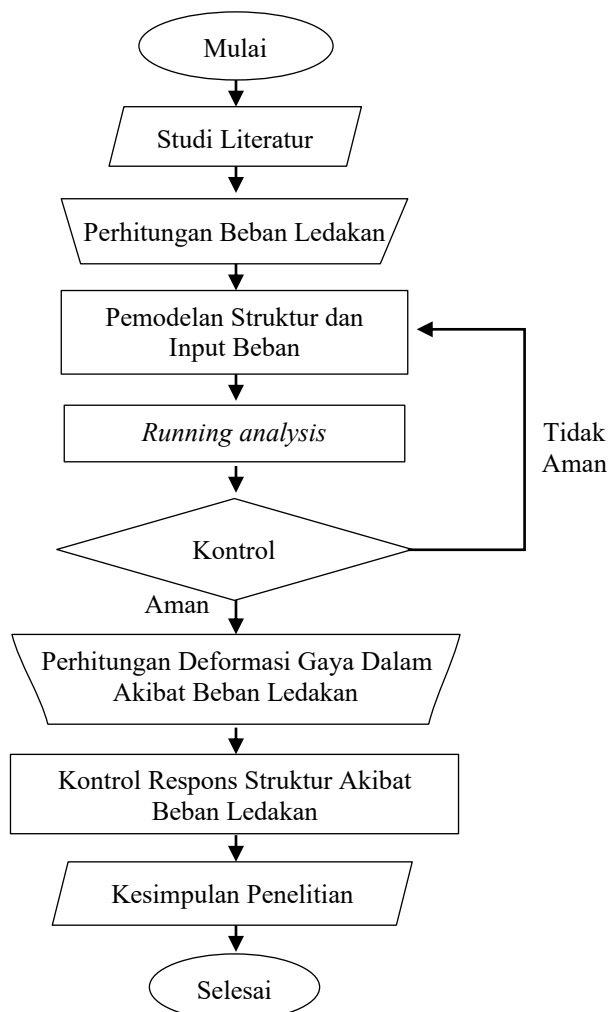
2.3 Data Bangunan

Objek observasi dalam penelitian ini difokuskan pada elemen atap fasilitas strategis yang mengacu pada gambar rencana (as-built drawing) dan spesifikasi teknis bangunan, dengan rincian sebagai berikut:

1. Fungsi bangunan : Gedung pelindung aset vital
2. Sistem struktur : Struktur komposit
3. Tebal pelat : 450 mm
4. Profil Baja : BA1 (WF 688×255×13,2×21 mm)
: BI1 (WF 918,4 ×305,5 ×17,3 ×27,9 mm)
5. Kuat tekan beton (f_c') : 35 MPa
6. Modulus Elastisitas (E_c) : 28805,57 MPa
7. Tegangan leleh baja tulangan (f_y) : 420 MPa
8. Tegangan leleh baja profil (f_y) : ASTM A572 Gr50 / 344 MPa
9. Modulus Elastisitas Baja (E) : 200.000 MPa

2.4 Alur Penelitian

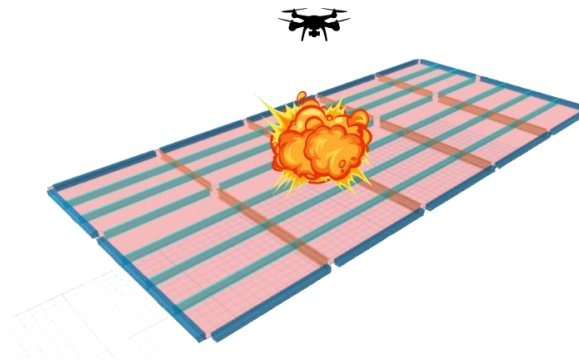
Studi ini secara sistematis mengintegrasikan pendekatan numerik dan analitik untuk mengevaluasi respons struktur beton bertulang terhadap beban ledakan dalam sebuah kerangka analisis yang terstruktur.



Gambar 1. Alur Penelitian
Sumber (Peneliti, 2026)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pembebanan Ledakan



*Gambar 2. Pemodelan Pembebanan
Sumber (Peneliti, 2026)*

Pada desain gedung tahan ledakan disimulasikan terjadi sabotase dengan serangan *drone* yang meledak tepat di atas atap gedung seperti pada Gambar 2. Mengacu pada karakteristiknya, kejadian ini dikategorikan sebagai tipe ledakan di udara (*free-air burst*) dengan jarak tegak lurus tertentu dari permukaan struktur. Jika berat bahan peledak digunakan seberat (*W*) 1 kg satuan TNT dan jarak sumber ledakan (*R*) direncanakan setinggi 3 meter dari permukaan atap bangunan. Parameter gelombang ledakan yang perlu dihitung dalam penentuan besarnya beban ledakan pada suatu struktur adalah sebagai berikut:

a. Hukum Penskalaan Hopkinson-Cranz (*Z*)

$$W = 1 \text{ kg TNT} \times \text{faktor keamanan} = 1 \text{ kg TNT} \times 1,2$$

$$W = 1,2 \text{ kg TNT} = 2,646 \text{ lb}$$

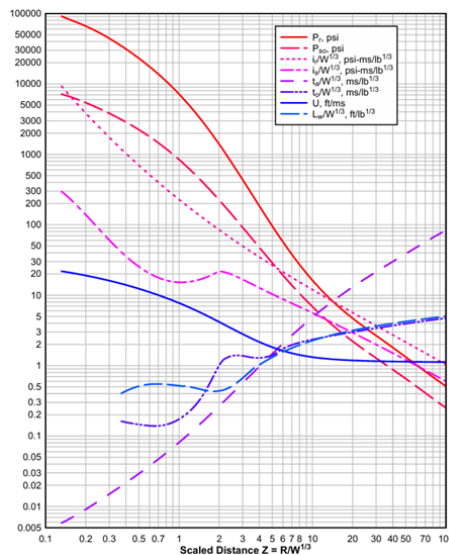
$$R = 3 \text{ meter} = 9,843 \text{ ft}$$

Maka, *Z* dapat dihitung sebagai berikut :

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{9,843}{2,646^{1/3}} = 7,117 \text{ ft/lb}$$

b. Analisis Grafik Parameter Gelombang

Penentuan parameter beban ledakan dilakukan dengan menggunakan grafik empiris Kingery-Bulmash yang disajikan dalam skala logaritmik pada Gambar 3. Grafik tersebut memungkinkan perolehan nilai amplitudo, durasi, dan impuls untuk fase positif gelombang ledakan secara langsung.



*Gambar 3. Grafik Parameter Ledakan
Sumber (UFC 3-340-02 2008 Figure 2-7)*

Dari grafik tersebut didapatkan parameter gelombang ledakan insiden sebagai berikut:

Tekanan Refleksi Puncak

$$P_r = 32 \text{ psi} = 220,6 \text{ kPa}$$

Tekanan Datang

$$P_{so} = 13 \text{ psi} = 89,6 \text{ kPa}$$

Waktu Kedatangan Gelombang Kejut

$$t_a = 2,90 \text{ ms/lb}^{1/3} = 2,90 \times (2,646)^{1/3} = 4,01 \text{ ms}$$

Durasi Fase Tekanan Positif

$$t_o = 2,00 \text{ ms/lb}^{1/3} = 2,00 \times (2,646)^{1/3} = 2,77 \text{ ms}$$

c. Analisis Grafik Parameter Gelombang

Perhitungan riwayat waktu tekanan, $P(t)$ dengan menggunakan persamaan Friedlander sebagai berikut:

$$P(t) = P_r \times \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \times e^{-b \times \frac{t}{t_o}} \quad (1)$$

Hasil perhitungan riwayat waktu tekanan untuk beban ledakan 1kg TNT sebagai berikut.

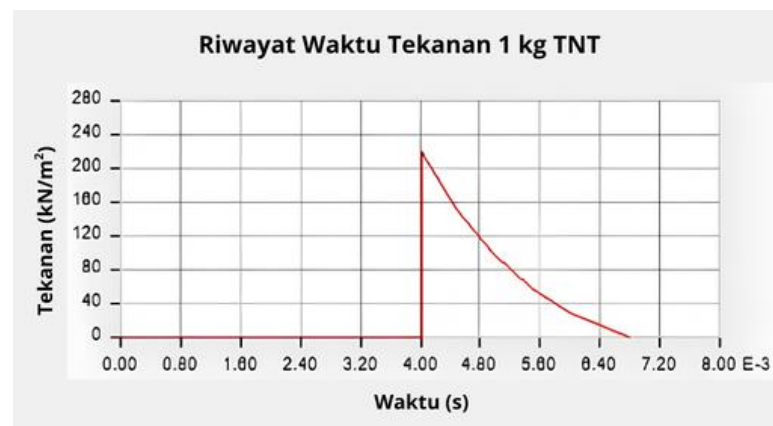
Tabel 1. Riwayat Waktu Tekanan (1kg TNT)

t (s)	P_r (kN/m ²)	$t_a + t$ (s)	Keterangan
0,0000	0,0	0,0000	Kondisi Awal
0,0000	0,0	0,0040	Gelombang Datang
0,0000	220,6	0,0040	Tekanan Puncak
0,0005	150,3	0,0045	Fase Perluruhan
0,0010	97,5	0,0050	Fase Perluruhan
0,0015	58,1	0,0055	Fase Perluruhan
0,0020	29,3	0,0060	Fase Perluruhan
0,0025	8,5	0,0065	Fase Perluruhan
0,0028	0,0	0,0068	Fase Akhir Positif

Sumber (Peneliti, 2026)

Berdasarkan hasil perhitungan riwayat waktu tekanan metode Friedlander untuk beban ledakan 1 kg TNT, gelombang ledakan mencapai struktur pada waktu 0,0040 detik dengan tekanan puncak sebesar 220,6 kN/m². Setelah mencapai nilai maksimum, tekanan mengalami perluruhan secara bertahap hingga menurun menjadi nol pada waktu 0,0068 detik. Pola ini menunjukkan karakteristik khas gelombang ledakan, yaitu kenaikan tekanan yang sangat cepat diikuti penurunan eksponensial selama fase positif.

Parameter dan nilai riwayat waktu beban ledakan yang sudah didapatkan, selanjutnya dimasukkan pada ETABS sebagai fungsi *Time History*. Pilih *Define* → *Functions* → *Time History* → *Add New* → masukkan nilai riwayat waktu yang telah didapat sesuai dengan beban ledakan. Didapatkan grafik tekanan ledakan terhadap waktu sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik Riwayat Waktu Tekanan

Sumber (time history ETABS)

3.2 Analisis Balok Baja Komposit

Analisis dilakukan setelah permodelan menggunakan aplikasi analisis struktur berupa ETABS v22.0.0, maka diperoleh gaya dalam balok baja komposit. Parameter pengecekan mencakup kelangsingan penampang, kapasitas nominal (kuat lentur dan kuat geser), serta batas layan berupa lendutan dan rotasi sudut tumpuan. Selanjutnya dilakukan perhitungan balok baja komposit tipe balok anak sebagai berikut:

Profil Baja WF 688×255×13,2×21mm (BA1)

Material Baja (A572 Gr 50)

$$F_u = 448,16 \text{ MPa}$$

$$F_y = 344,74 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{baja}} = 200000 \text{ MPa}$$

Material Beton (f'_c 35)

$$f'_c = 35 \text{ MPa}$$

$$t_s = 450 \text{ mm}$$

$$E_{\text{beton}} = 28805,57 \text{ MPa}$$

a. Faktor Peningkatan Dinamis (DIF)

Dalam melakukan analisa perhitungan kapasitas lentur saat kondisi dinamis, UFC 3-340-02 2008 merekomendasikan perhitungan dengan koefisien sebagai berikut:

Material Baja

$$f_{dy} = c \times a \times f_y = 1,29 \times 1,1 \times 344,74 = 489,19 \text{ MPa}$$

$$f_{du} = f_u \times c = 448,16 \times 1,1 = 670,45 \text{ MPa}$$

Material Beton

$$f'_{dc} = f'_c \times \text{DIF} = 35 \times 1,19 = 42 \text{ MPa}$$

b. Menghitung Lebar Efektif dan Kelangsingan Penampang

Lebar Efektif Balok Komposit

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{eff}} &= \frac{1}{8} \times L = \frac{1}{8} \times 5403 = 675,38 \text{ mm} \\ B_{\text{eff}} &= \frac{1}{2} \times b_o = \frac{1}{2} \times 1943 = 971,50 \text{ mm} \end{aligned} \right\} B_{\text{eff}} = 675,38 \text{ mm (minimum)}$$

Kontrol Penampang Sayap

$$\lambda_f = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{255}{2 \times 21} = 6,07$$

$$\lambda_{pf} = 0,38 \times \sqrt{\frac{E_{\text{baja}}}{f_y}} = 0,38 \times \sqrt{\frac{200000}{489,19}} = 7,68$$

$$\lambda_{rf} = 1,0 \times \sqrt{\frac{E_{\text{baja}}}{f_y}} = 1,0 \times \sqrt{\frac{200000}{489,19}} = 20,2$$

$$\lambda_f \leq \lambda_{pf} \rightarrow 6,07 \leq 7,68 \dots \dots \text{Penampang Kompak}$$

Kontrol Penampang Badan

$$h = d - (2 \times t_f) = 688 - (2 \times 21) = 646 \text{ mm}$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{646}{13,2} = 48,94$$

$$\lambda_{pw} = 3,76 \times \sqrt{\frac{E_{\text{baja}}}{f_y}} = 3,76 \times \sqrt{\frac{200000}{489,19}} = 76,03$$

$$\lambda_{rw} = 5,70 \times \sqrt{\frac{E_{\text{baja}}}{f_y}} = 5,70 \times \sqrt{\frac{200000}{489,19}} = 115,3$$

$$\lambda_w \leq \lambda_{pw} \rightarrow 48,94 \leq 76,03 \dots \dots \text{Penampang Kompak}$$

Penampang sayap dan penampang badan dinyatakan KOMPAK.

c. Menghitung Kapasitas Momen

Gaya tekan maksimum beton

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times t_s \times B_{\text{eff}} = 0,85 \times 42 \times 450 \times 675,38 = 10759483,55 = 10759,48 \text{ kN}$$

Gaya tarik maksimum baja

$$T_s = A_s \times f_y = (192,37 \times 100) \times 489,19 = 9410570,07 \text{ N} = 9410,57 \text{ kN}$$

Letak garis netral plastis

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times B_{\text{eff}}} = \frac{T_s}{0,85 \times f'_c \times B_{\text{eff}}} = \frac{9410570,07}{0,85 \times 42 \times 675,38} = 393,58 \text{ mm}$$

$$a < t_s \rightarrow 330,07 < 450 \dots \dots \text{Pelat}$$

Tinggi balok tekan pada sayap profil baja

$$d_f = \frac{h}{2} + t_s - \frac{a}{2} = \frac{646}{2} + 450 - \frac{393,58}{2} = 576,21 \text{ mm}$$

Kuat Lentur

$$M_U = 1068,92 \text{ kNm} \dots \dots \text{output ETABS}$$

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(\frac{h}{2} + t_s - \frac{a}{2} \right) = T_s \times d_f = 9410570,07 \times 576,21 \\ = 5422447527,3 \text{ Nmm} = 5422,4 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times 5422,4 = 4880,2 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n > M_U \rightarrow 4880,2 > 1068,92 \dots \dots \text{OK}$$

d. Menghitung Kapasitas Geser

Koefisien tekuk geser pelat badan

$$K_v = 5,34 \text{ (tanpa pengaku transversal)}$$

Koefisien kekuatan geser badan

$$\frac{h}{t_w} \leq 1,10 \times \sqrt{\frac{K_v \times E}{f_y}} \rightarrow \frac{646}{13,2} \leq 1,10 \times \sqrt{\frac{5,34 \times 200000}{489,19}}$$

$$48,94 \leq 51,45 \dots \dots \text{Sesuai SNI 1729: 2020}$$

$$\text{maka, } C_{v1} = 1,00$$

Luas badan

$$A_w = d \times t_w = 688 \times 13,2 = 9081,60 \text{ mm}^2$$

Kuat Geser

$$V_U = 797,95 \text{ kN} \dots \dots \text{output ETABS}$$

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w \times C_{v1} = 0,6 \times 489,19 \times 9081,60 \times 1 = 2665555,3 \text{ N} \\ = 2665,56 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = 1,0 \times 2665,56 = 2665,56 \text{ kNm}$$

$$\phi V_n > V_U \rightarrow 2665,56 > 797,95 \dots \dots \text{OK}$$

e. Menghitung Kontrol Lendutan

$$\delta^{\circ} \text{max} = 10,834 \text{ mm} \dots \dots \text{output ETABS}$$

Lendutan ijin (SNI 2847:2019)

$$\delta_{\text{ijin}} = \frac{L}{180} = \frac{5403}{180} = 30,017 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{ijin}} \geq \delta^{\circ} \rightarrow 30,017 \geq 10,834 \dots \dots \text{OK}$$

f. Menghitung Rotasi Sudut

$$\tan \theta = \frac{\delta^{\circ}}{L/2} \text{ atau } \theta = \arctan \frac{\delta^{\circ}}{L/2} = \arctan \frac{10,834}{5403/2} = 0,23^{\circ}$$

Batas rotasi sudut (ASEC 59-11)

$$\theta_{\text{ijin}} = 3^{\circ}$$

$$\theta_{\text{ijin}} > \theta \rightarrow 3^{\circ} > 0,23^{\circ} \dots \dots \text{OK}$$

Dengan menggunakan metode perhitungan dan geometri yang sama, jika dilakukan 4 variasi besar beban ledakan dalam TNT yaitu 0,5kg TNT, 1kg TNT, 5kg TNT, dan 10kg TNT serta analisis pada jenis balok berbeda Profil Baja WF 918,4 × 305,5 × 17,3 × 27,9 mm (B11) tipe balok induk. Didapatkan rekapitulasi sebagai berikut :

Tabel 2. Rekapitulasi Perhitungan Beban Ledakan

Kapasitas Momen dan Geser								
Profil Baja	W	M _u	V _u	ΦM _n	ΦV _n	M _u	V _u	Keterangan
	kg TNT	kNm	kN	kNm	kN	ΦM _n	ΦV _n	
Balok Anak BA1	0.5	1068.92	797.95	4880.20	2665.56	0.22	0.30	OK
	1.0	1671.24	1247.58	4880.20	2665.56	0.34	0.47	OK
	5.0	5104.16	3810.25	4880.20	2665.56	1.05	1.43	TIDAK OK
	10.0	10355.16	7730.11	4880.20	2665.56	2.12	2.90	TIDAK OK
Balok Induk BI1	0.5	4252.23	1579.19	10628.04	4663.41	0.40	0.34	OK
	1.0	6500.10	2254.11	10628.04	4663.41	0.61	0.48	OK
	5.0	19311.91	6100.86	10628.04	4663.41	1.82	1.31	TIDAK OK
	10.0	38908.82	11984.83	10628.04	4663.41	3.66	2.57	TIDAK OK
Lendutan dan Rotasi Sudut								
Profil Baja	W	δ°	δ _{ijin}	θ	θ _{ijin}	Keterangan		
	kg TNT	mm	mm	(°)	(°)			
Balok Anak BA1	0.5	10.83	30.02	0.23	3	OK		
	1.0	16.94	30.02	0.36	3	OK		
	5.0	51.73	30.02	1.10	3	OK		
	10.0	104.95	30.02	2.22	3	OK		
Balok Induk BI1	0.5	14.01	77.78	0.11	3	OK		
	1.0	15.25	77.78	0.12	3	OK		
	5.0	22.27	77.78	0.18	3	OK		
	10.0	33.01	77.78	0.27	3	OK		

Sumber (Peneliti, 2026)

Hasil analisis menunjukkan bahwa perhitungan rasio kuat lentur nominal (M_n) terhadap momen ultimit (M_u) dan rasio kuat geser nominal (V_n) terhadap geser ultimit (V_u) menunjukkan bahwa setelah beban ledak 0,5kg TNT, 1kg TNT masih dapat ditahan oleh kedua tipe balok baja komposit dengan respon rasio gaya dalam terhadap kapasitas penampang di bawah angka 1,0 dan setelah beban ledak 5kg TNT, 10kg TNT respon rasio gaya dalam terhadap kapasitas penampang kedua tipe balok baja komposit di atas angka 1,0 yang artinya sudah melebihi batas kapasitas penampang dalam kondisi aman.

Sedangkan respon defleksi berupa lendutan (δ°) dan respon deformasi berupa rotasi sudut (θ) menunjukkan bahwa setelah 4 variasi besar beban ledakan memberikan respon defleksi dengan nilai lendutan pada tipe balok anak sebesar 51,73 mm melebihi batas lendutan ijin sebesar 30,02 mm setelah beban ledak 5kg TNT dan untuk respon deformasi nilai rotasi sudut kedua tipe balok baja komposit masih dalam batas kriteria rotasi sudut yang diijinkan sebesar 3° .

3.3 Hubungan Kapasitas Penampang Terhadap Respon Deformasi

Analisis terhadap elemen balok baja komposit menunjukkan bahwa respons bangunan sangat bergantung pada besaran energi ledakan yang diserap. Pada paparan ledakan skala kecil (0,5 hingga 1 kg TNT), struktur beroperasi penuh dalam fase elastis. Dalam konsep sederhana, elemen balok bertindak menyerupai pegas dengan kekakuan tinggi yang mengalami defleksi sesaat dan segera kembali ke konfigurasi geometri semula tanpa meninggalkan deformasi plastis. Pada fase ini, rasio tegangan material masih berada di bawah ambang batas kritis (di bawah angka 1,0). Riset terbaru mengonfirmasi bahwa kekakuan bawaan dari sistem komposit memang didesain secara efektif untuk menahan tekanan impulsif tingkat rendah tanpa menimbulkan kelelahan pada material (Yu *et al.*, 2023).

Skenario berubah drastis ketika beban ledakan ditingkatkan secara ekstrem menjadi 5 hingga 10 kg TNT. Gelombang kejut yang masif memaksa struktur masuk ke dalam fase "*elasto-plastis*". Pada kondisi ini, balok SB1 mengalami lendutan sebesar 51,73 mm, jauh melampaui batas lendutan ijin sebesar 30,02 mm. Dalam kriteria desain konvensional, kondisi ini sering kali diinterpretasikan sebagai kegagalan elemen. Namun, dalam konteks beban ledakan, perilaku daktil ini justru menjadi garis pertahanan terakhir. Balok tidak patah secara getas, melainkan merespons secara nonlinear dengan membengkok secara ekstrem. Perilaku ini memastikan bahwa energi ledakan dihabiskan untuk mendeformasi material, alih-alih menghancurkan koneksi kritis yang dapat memicu keruntuhan gedung seketika.

Mekanisme pengorbanan ini sukses mencegah patahnya sambungan tumpuan secara total (mencegah sendi plastis penuh), yang dibuktikan dengan nilai rotasi sudut tumpuan yang masih bertahan di rentang aman, yakni di bawah 3°. Paradigma ini merupakan inti dari pedoman desain fasilitas pelindung ekstrem militer internasional, kerusakan lokal atau fisik pada elemen struktur dapat diabaikan sepenuhnya, selama keruntuhan global dapat dicegah dan target utama, yakni keselamatan nyawa penghuni di dalamnya berhasil dicapai (Al-Bazoon & Arora, 2024).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis balok baja komposit terhadap beban ledakan udara (*Free-Air Burst*), struktur menunjukkan transisi perilaku dari fase elastis ke elasto-plastis. Pada paparan beban rendah (0,5 hingga 1 kg TNT), struktur beroperasi secara aman dengan rasio tegangan penampang di bawah batas 1,0. Namun, pada beban ekstrem (5 hingga 10 kg TNT), tegangan material melonjak melampaui batas aman dan memicu lendutan masif pada balok anak (SB1) hingga 51,73 mm, yang jauh melewati batas lendutan izin 30,02 mm. Meskipun dinilai gagal secara statis, daktilitas material komposit secara efektif menyerap energi ledakan tanpa memicu patah getas. Mekanisme pengorbanan ini sukses menjaga rotasi sudut tumpuan tetap berada di rentang aman, yakni di bawah kriteria kritis 3°. Hal ini memastikan bahwa keruntuhan gedung secara keseluruhan dapat dicegah, sekaligus memenuhi filosofi utama desain pelindung ekstrem yaitu keselamatan nyawa penghuni (*life safety*).

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Bazoon, M., & Arora, J. S. (2024). Design of Structures Subjected to Blast Loads: Analysis and Design Review. *Misan Journal of Engineering Sciences*, 3(1), 16–37. <https://doi.org/10.61263/mjes.v3i1.70>
- Anas, S. M., & Alam, M. (2021). Comparison of Existing Empirical Equations for Blast Peak Positive Overpressure from Spherical Free Air and Hemispherical Surface Bursts. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 965–984. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00718-4>
- Anas, S. M., Nasr, R., Dala, A.-, Tahzeeb, R., Shariq, M., & Alam, M. (2023). A Concise Overview of Numerical Simulation Tools and Techniques for Anti-Explosion Response Prediction of Infrastructures and Facilities. *E3S Web of Conferences*, 434.
- Catovic, A., & Kljuno, E. (2021). Comparison of analytical models and review of numerical simulation method for blast wave overpressure estimation after the explosion. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 6(1), 748–756. <https://doi.org/10.25046/aj060182>
- Fu, T., Zhang, M., Zheng, Q., Zhou, D., Sun, X., & Wang, X. (2021). Scaling the response of armor steel subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 153(March), 103863. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103863>
- Hussein, A., & Heyliger, P. (2025). Blast Pressure Simulation of a Suicide Vest Attack. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 18(1), 249–258. <https://doi.org/10.24237/djes.2025.18115>
- Kilicer, S. (2025). The Impact of Weapon Systems on Structural Damage and Progressive Collapse : A Case Study of Belgorod Oblast. *Yuzuncu Yil University Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences*, 30(1), 215–234. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1511907>
- Lai, D., Nocera, F., Demartino, C., Xiao, Y., & Gardoni, P. (2024). Probabilistic models of dynamic increase factor (DIF) for reinforced concrete structures : A Bayesian approach. *Structural Safety*, 108(January), 102430. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102430>
- Malathy, R. B., Bhatt, G., & Chowdhury, S. (2024). Parametric study of blast loads on structures. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(6), 4395–4416. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01055-3>
- Marpahiko, G., Elvira, & Sutandar, E. (2021). Kalkulasi Analisis Struktur Desain Beban Gempa Dan Performanya Terhadap Beban Ledakan Pada Gedung BRI Cabang Pontianak. *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 8(2), 1–10. <https://doi.org/10.26418/jelast.v8i2.49058>
- Osman, A. A., & Mourad, S. A. (2021). Performance of extended end-plate bolted connections subjected to static and blast-like loads. *Journal of Engineering and Applied Science*, 68(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00001-3>
- Satiawan, B. (2021). Deformasi Dinding Struktur Akibat Beban Ledakan. *Jurnal Konstruksia*, 13(1), 152–163. <https://doi.org/10.24853/jk.13.1.152-163>
- Sugiyono. (2019). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R & D. In *cv. ALFABETA*.
- Suwandy, A. H., Herianto, H., & Nursani, R. (2023). Perencanaan Ulang Struktur Baja-Beton Komposit Pada Gedung Radiologi Dan Ok (Operation Kamer) Di Rsud Pameungpeuk Kabupaten Garut. *Akselerasi : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 4(2), 57–73. <https://doi.org/10.37058/aks.v4i2.5473>



Yu, S., Zhang, G., Wu, H., Wang, Z., Yao, J., Sun, Q., Wang, M., & He, Y. (2023). Experimental study on the elastic-plastic dynamic response of shallow-buried corrugated steel-plain concrete composite structures under long-duration plane blast wave loading. *Engineering Structures*, 285(March), 115986. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115986>