

DEFORMASI DINDING STRUKTUR AKIBAT BEBAN LEDAKAN

Budi Satiawan^{1,2}

¹Prodi Teknik Sipil, Teknik Sipil, Universitas Tarumanegara, Jl. Letjen S. Parman No. 1 Jakarta Barat 11440

²Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510

Email : budi.satiawan@umj.ac.id, budi.satiawan@gmail.com

ABSTRAK

Pada fasilitas produksi dan pengolahan minyak dan gas beserta turunannya yang menangani material hidrokarbon dan bahan yang mudah terbakar lainnya memiliki risiko terhadap kemungkinan terjadinya suatu insiden berupa ledakan. Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi analisa beban ledakan pada bangunan tahan ledakan menggunakan rekomendasi dari ASCE, Design of Blast-Resistance Buildings in Petrochemical Facilities, 2010. Simulasi dilakukan pada desain bangunan tahan ledakan dengan geometri panjang bangunan, 12 m, lebar 6 m dan tinggi 5 m. Beban ledakan yang diberikan, Peak Side Positive overpressure (PSo) bervariasi yaitu 35kPa, 70 kPa, 105 kPa, 140 kPa, 175 kPa dan 210 kPa. Dari hasil simulasi dapat diperoleh bahwa dengan ketebalan dinding muka 40 cm dapat diperoleh respon dinding berupa rotasi sudut pada ujung dinding sebesar 0.29°, 0.60°, 1.06°, 1.2°, 2.39°, 4.17° dan 5.55° yang artinya pada beban ledakan 140 kPa, 175 kPa dan 210 kPa sudah melebihi kriteria perubahan bentuk sesuai performa yang diijinkan yaitu 2°. Sedangkan simulasi lainnya yang dilakukan terhadap variasi ketebalan dinding muka diperoleh dengan beban ledakan, (PSo) sebesar 70 kPa diperoleh bahwa ketebalan dinding kurang dari 200mm tidak memenuhi performa deformasi yang diijinkan.

Kata kunci: Beban Ledakan, ASCE 2010, performa, deformasi, rotasi sudut.

ABSTRACT

In the production and processing of oil and gas and their derivatives that handling hydrocarbon and flammable materials have possibility to an explosion incident. In this study, some analysis of the explosion load was carried out in the blast resistance buildings using the recommendations from ASCE, Design of Blast-Resistance Buildings in Petrochemical Facilities, 2010. The simulations were carried out with the building geometry 12m length, 6m width, and 5m height. The explosion load, Peak Side Positive overpressure (PSo) given varies, 35kPa, 70kPa, 105kPa, 140kPa, 175kPa and 210 kPa. From simulation, It can be obtained that a front wall thickness of 40cm, the wall response as a rotation angle at the end of the wall are 0.29°, 0.60°, 1.06°, 1.2°, 2.39°, 4.17° and 5.55°, which means that the load of 140kPa, 175kPa and 210 kPa has exceeded the deformation limit criteria according to the performance that occurs, which is 2°. Whereas the other simulations that carried out on variations in wall thickness obtained with a blast load, (PSo) 70 kPa found that a wall thickness less than 200cm did not meet the deformation performance that was allowed.

Keywords: Blast load, ASCE 2010, performance, deformation, rotation angle

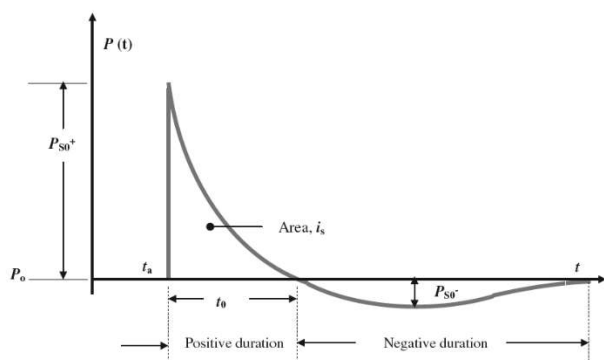
1. PENDAHULUAN

Dalam mensimulasikan beban ledakan, perilaku beban ledakan diwakilkan dari hubungan antara fungsi waktu dan besarnya tekanan yang terjadi. Beban ledakan puncak terjadi pada saat fase tekanan positif, dimana tekanan yang terjadi berada di atas

besaran tekanan awal area sekitar (*ambient pressure, Po*). Fase positif ini dapat terjadi dengan durasi sepanjang tekanan positif terjadi (*positive duration, to*). Fase dimana tekanan akibat beban ledakan berada lebih rendah terhadap tekanan awal di area sekitar disebut dengan fase tekanan negatif dengan lama durasi pembebanan sepanjang

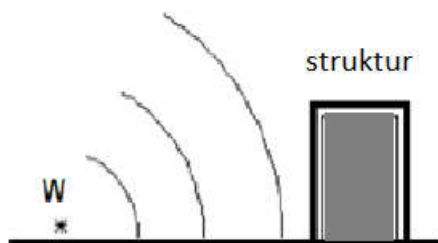
durasi negatif (*negative duration*). Dari semua parameter dalam setiap fase pembebanan pada gelombang ledakan tersebut termasuk kemungkinan terjadinya pembesaran tekanan yang ada akibat pantulan/refleksi yang terjadi (*reflected pressure*) ikut memberikan pengaruh terhadap kerusakan dan respon dari sistem struktur yang dikenai beban tersebut.

Gelombang beban ledakan yang terjadi secara ideal dapat ditunjukkan sebagaimana dalam gambar berikut:



Gambar 1. Fungsi Riwayat Waktu Gelombang Ledakan Ideal

Tipe ledakan yang terjadi diluar bangunan yang akan ditinjau ini dapat dikategorikan sebagai tipe ledakan *Surface bursts*. Tekanan yang terjadi dari ledakan tersebut dapat berinteraksi dengan muka tanah, terpantulkan dan selanjutnya menyebar secara *hemispheris* menjauhi pusat ledakan hingga mengenai struktur.



Gambar 2. Tipe Ledakan *Surface Bursts*

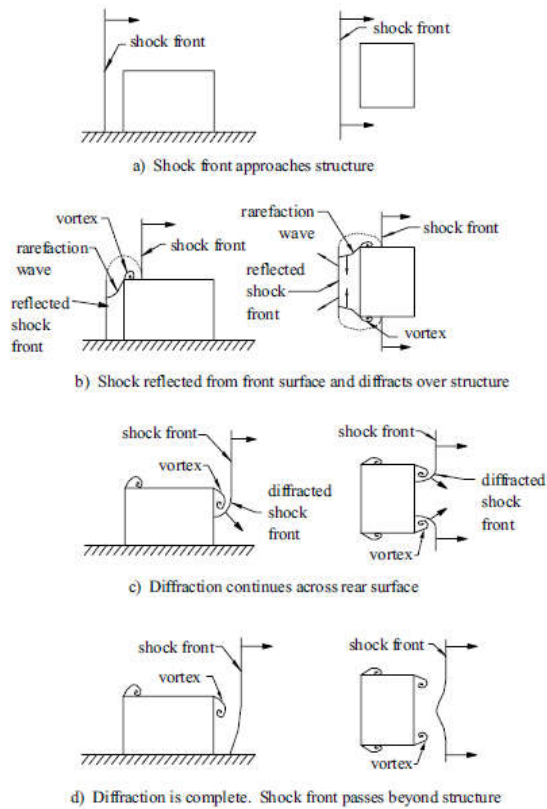
2. LANDASAN TEORI

Prosedur desain beban ledakan yang diatur di dalam ASCE, *Design of Blast-Resistance Buildings in Petrochemical Facilities*, 2010

menggunakan asumsi kondisi dimana beban kritis maksimal terjadi pada fase tekanan positif sedangkan kurva beban ledakan pada fase tekanan negatif diabaikan karena fase ini dianggap memiliki pengaruh yang relatif lebih kecil jika dibandingkan terhadap fase pembebanan positif. Tiap elemen struktur saat menerima beban ledakan disederhanakan menjadi komponen elemen individual (balok, kolom, dinding) yang diidealisasikan sebagai elemen SDOF.

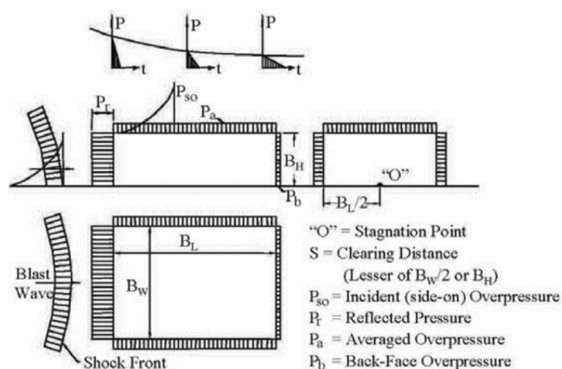
Beban Ledakan dalam industri petrokimia dapat diklasifikasi menjadi 4 tipe, yaitu *Vapor Cloud explosions (VCE)*, *Pressure Vessel Explosions*, *Condensed Phase Explosions* dan *Dust Explosions*. Saat beban ledakan mengenai bangunan, maka elemen struktur akan terbebani oleh suatu tekanan besar dan gaya seret yang disebabkan oleh gelombang ledakan. Interaksi antara gelombang ledakan dan bangunan cukup kompleks sebagaimana ilustrasi yang ditampilkan pada skematik dalam gambar 3.

Untuk kebutuhan desain, skematik dari interaksi hubungan antara beban gelombang ledakan dan bangunan pada gambar 3 dapat disederhanakan sebagaimana ilustrasi dalam gambar 4.



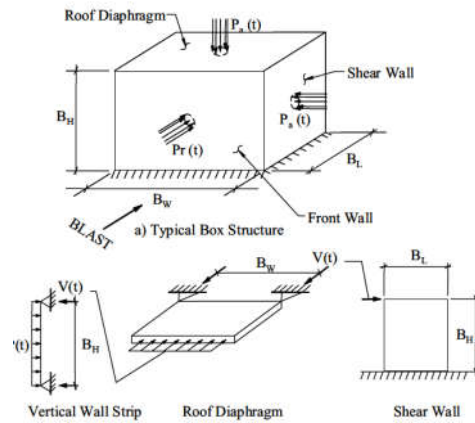
Gambar 3. Skematik Interaksi Ggelombang Ledakan Terhadap Bangunan Persegi (TNO Green Book, dikutip dari ASCE, 2010)

Gelombang ledakan yang ada, berjalan secara horizontal dari sisi kiri bangunan kesisi kanan bangunan. Bergantung dari jarak dan arah bangunan terhadap pusat ledakan, bangunan akan mengalami bermacam kombinasi dari efek ledakan seperti *reflected pressure*, *side on overpressure*, *dynamic pressure* dan *negative pressure*.



Gambar 4. Bentuk Umum Beban Ledakan untuk Bangunan Persegi (Fobes 1998, dikutip dari ASCE, 2010)

Untuk gaya akibat ledakan yang bekerja pada bagian utama bangunan dapat disederhanakan dengan idealisasi sebagaimana dalam gambar berikut:



Gambar 5. Gaya yang Bekerja pada Elemen Utama Struktur (ASCE, 2010)

Dalam mendesain bangunan tahan ledakan, AISC mendefinisikan beberapa parameter gelombang ledakan (*blast wave*) yang perlu ditentukan diawal desain beban ledakan, sebagaimana berikut:

- a) *Peak side positive overpressure* (P_{so}), panjang durasi phase positif (t_d) dari beban ledakan dan *Positive impuls*, I_o .
- b) *Peak side negative overpressure*, tekanan hisap (P_{so-}), durasi phase negatif (t_{d-}) dan impuls negative (I_{o-}).

Nilai dari *peak overpressure* dan impuls tersebut akan berkurang seiring dengan semakin jauhnya pusat ledakan terhadap titik yang ditinjau. Parameter gelombang ledakan lainnya yang perlu dihitung adalah sebagai berikut:

- *Peak reflected pressure*, P_r
- *Peak dynamic (blast wind) pressure*, q_o
 $q_o = 0.022(P_{so})^2$ (1)
- *Shock front velocity*, U
 $U = 1130(1 + 0.058P_{so})^{0.5}$ (ft/sec), P_{so} dalam Psi (2)
 $U = 345(1 + 0.0083P_{so})^{0.5}$ (m/sec), P_{so} dalam Kpa (3)
- *Blast wave length*, L_w

$$L_w = U (t_d) \quad (4)$$

Besaran beban yang dikenai pada struktur akan memiliki muatan yang berbeda baik

yang terjadi di dinding sisi muka dari pusat ledakan, dinding bagian samping maupun pada sisi pelat bagian atap dari bangunan.

Beban ledakan pada dinding sisi muka

Pada sisi dinding yang berada tepat dimuka titik ledakan akan mengalami suatu tekanan yang disebut *reflected overpressure*, dimana tekanan puncak yang terjadi dinyatakan sebagai *Peak reflected pressure* (P_r).

$$P_r = C_r \cdot P_{s0} \tag{3}$$

dengan C_r = reflection coefficient

$$\begin{aligned} C_r &= P_r / P_{s0} \\ &= (2 + 0.05P_{s0}), \text{ (psi)} \\ &= (2 + 0.0073P_{s0}), \text{ (kPa)} \end{aligned}$$

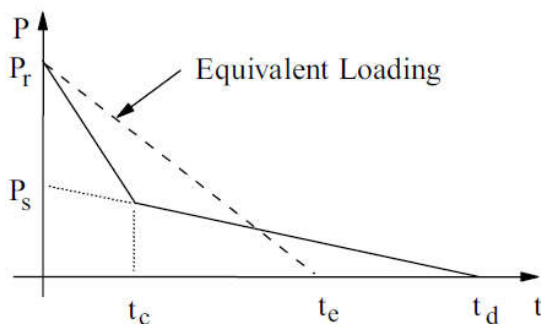
$$P_s = P_{s0} + C_d \cdot q_0 \tag{4}$$

$$t_c = 3S / U < t_d \tag{5}$$

dengan S = jarak bersih, terkecil antara BH atau $BW/2$, BH = tinggi bangunan, BW = lebar bangunan, BL = panjang bangunan

$$I_w = 0.5(P_r - P_s)t_c + 0.5P_s \cdot t_d \tag{6}$$

$$t_e = 2 I_w / P_r = (t_d - t_c)P_s / P_r + t_c \tag{7}$$



Gambar 6. Kurva Beban Ledakan (Dinding Muka)

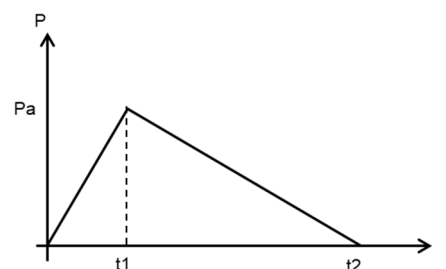
Bentuk kurva beban ledakan maksimal dalam ASCE disederhanakan sebagai beban segitiga dengan hanya mempertimbangkan tekanan positif. Grafik dari hubungan tekanan terhadap fungsi waktu ini akan digunakan mewakili beban ledakan dalam analisa dinamis untuk memperoleh respon dari dinding struktur bagian muka bangunan.

Beban ledakan sisi dinding samping

Besarnya tekanan yang terjadi untuk sisi dinding samping bangunan, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_a = C_e \cdot P_{s0} + C_d \cdot q_0 \tag{8}$$

dengan P_a = tekanan berlebih di sisi yang efektif untuk dinding samping, C_e = faktor reduksi (tergantung pada panjang elemen struktur), C_d = koefisien drag : (+1) untuk bagian depan bangunan persegi panjang : (-0.4) untuk sisi samping, belakang & atap bangunan persegi panjang



Gambar 7. Kurva Beban Ledakan (Dinding Samping)

Nilai t_1 dan t_2 dari grafik fungsi waktu kurva beban ledakan yang mengenai dinding samping dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$t_1 = BL / U \tag{9}$$

$$t_2 = BL / U + t_d \tag{10}$$

Beban ledakan pada pelat atap

Untuk kemiringan atap yang kurang dari 10° , biasanya diasumsikan tidak akan terjadi refleksi saat gelombang ledakan bergerak secara horizontal, sehingga atap hanya mengalami *overpressure side-on* seperti pada dinding samping dengan besaran yang dapat dihitung menggunakan persamaan sebagaimana berikut:

$$P_a = C_e P_{s0} + C_d q_0 \tag{11}$$

Beban ledakan pada dinding belakang

Dikarenakan posisi beban ledakan dapat terjadi dari semua arah, dan posisi dari dinding bagian belakang berlawanan dengan dinding sisi muka saat menerima beban ledakan maka umumnya pertimbangan desain dari sisi dinding bagian belakang ini diabaikan sehingga

kriteria desain cukup menggunakan sisi bagian muka dan samping.

Beban ledakan pada rangka bangunan (frame)

Selain memperoleh beban yang berasal dari atap, rangka bangunan juga akan menerima beban lateral akibat ledakan yang dirambatkan dari dinding sisi muka ke sisi belakang dari beban ledakan yang terjadi dari arah tertentu.

Kinerja bangunan tahan ledakan

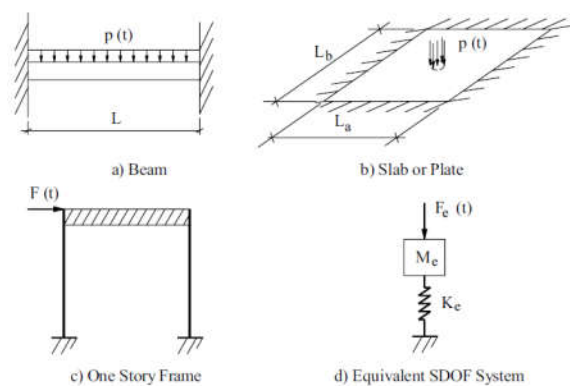
Persyaratan kinerja untuk bangunan tahan ledakan meliputi pembatasan pada defleksi member struktur, simpangan tingkat dan level kerusakan yang terjadi. Respon kriteria sesuai performance bangunan sesuai rekomendasi ASCE 2010, Appendix 5B adalah sbb:

Tabel 1. Tingkat Kerusakan Bangunan

Damage Level	Description
Low	Localized component damage. Building can be used, however repairs are required to restore integrity of structural envelope. Total cost of repairs is moderate.
Medium	Widespread component damage. Building shouldn't be occupied until repaired. Total cost of repairs is significant.
High	Key components may have lost structural integrity and building collapse due to environmental conditions (i.e. wind, snow, rain) may occur. Building shouldn't be occupied. Total cost of repairs approaches replacement cost of building.

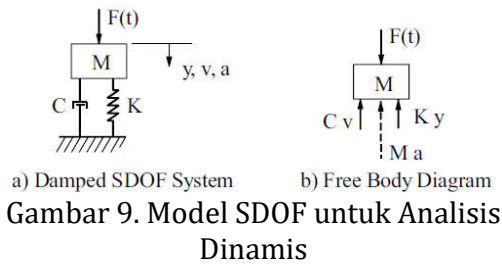
Low	Component has none to slight visible permanent damage.
Medium	Component has some permanent deflection. It is generally repairable, if necessary, although replacement may be more economical and aesthetic
High	Component has no failed, but it has significant permanent deflections causing it to be unreparable

Untuk memperoleh respons daktilitas yang diharapkan dari beton dibutuhkan pendetailan terhadap desain penulangan beton bertulang. UFC 3-340-02 memberikan rekomendasi untuk material baja yang digunakan untuk memberikan tingkat daktilitas yang diharapkan saat menerima beban ledakan adalah Grade 60 (60 ksi) dan mutu beton minimum 3000 psi (20.7 Mpa). Dalam analisa dinamis, respons perilaku elemen struktur pelat yang dievaluasi dilakukan secara terpisah (dinding, lantai dan atap) dan diidealisasikan sebagai sistem SDOF. Untuk memudahkan analisis sebagai equivalen SDOF, umumnya elemen struktur dapat diasumsikan berperilaku satu arah. Beberapa ilustrasi elemen struktur dapat ditampilkan sebagai berikut:



Gambar 8. Tipe Struktur dengan Sistem SDOF

Tabel 2. Respon Komponen Struktur

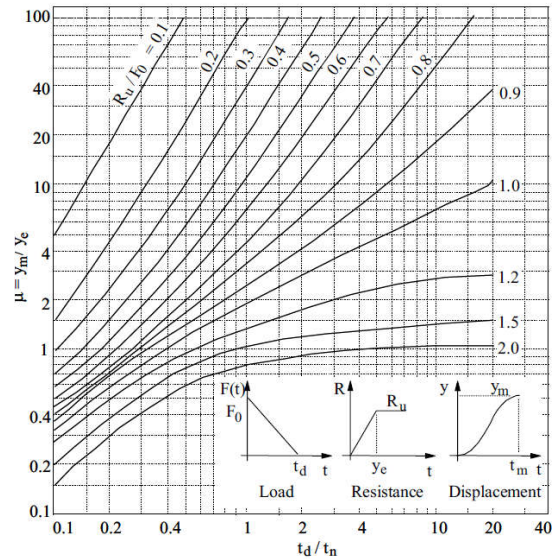


Persamaan kesetimbangan untuk sistem SDOF dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$M a + C v + K y = F(t) \quad (12)$$

dengan M = Masa, a = Percepatan, C = Konstanta redaman. v = Kecepatan, K = Kekakuan

Secara sederhana, dalam menyelesaikan permasalahan untuk bangunan 1 lantai dari bangunan tahan ledakan digunakan pendekatan sistem SDOF. Dari dimensi ukuran awal elemen struktur dan luas tulangan yang telah ditentukan diawal, dapat diperoleh kapasitas lentur dinamis dan kapasitas geser dinamis dengan mempertimbangkan faktor pembesaran dinamis yang diberikan oleh ASCE. Dengan menghitung besaran dari karakter dinamis sistem, terkait nilai massa dan perioda getar alami maka dengan menggunakan grafik *Solution Chart* (gambar 10) dapat dihitung besarnya defleksi maksimal yang terjadi pada elemen struktur tersebut sehingga besarnya perputaran rotasi sudut ujung yang terjadi pada dinding juga dapat dihitung.



Gambar 10. *Graphical Solution Chart* untuk *Elasto-Plastic Sistem SDOF*

3. IDENTIFIKASI MASALAH

Dalam analisa dinamis, besarnya beban dinamis yang bekerja serta kekakuan dari sistem struktur akan memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap respon dari struktur. Dengan kondisi beban ledakan yang berupa beban dinamis maka peneliti tertarik untuk mengetahui seberapa besar pengaruh beban ledakan terhadap respon suatu desain bangunan tahan ledakan.

4. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh beban ledakan terhadap respon deformasi dari elemen struktur dinding yang didesain dengan prinsip bangunan tahan ledakan.

5. BATASAN MASALAH

Batasan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Elemen struktur yang ditinjau akibat beban ledakan hanya pada sisi dinding muka ledakan
- Dimensi Struktur tertentu dengan dengan geometri panjang bangunan, $B=12m$, lebar, $L=6m$, Tinggi, $H=5m$.
- Beban ledakan berupa surface bursts yang bekerja diluar bangunan

- d. Arah beban ledakan berada dimuka sisi bangunan dengan lebar 6m.

6. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada desain bangunan tahan ledakan dengan geometri panjang bangunan, $B = 12$ m, lebar, $L = 6$ m, Tinggi, $H = 5$ m. Jika diperoleh nilai *Peak side positive overpressure* (P_{so}) sebesar 70 kPa dan durasi ledakan, t_d adalah 0.02 sec. Pada sisi dinding yang berada tepat dimuka titik ledakan akan mengalami suatu tekanan yang disebut *reflected overpressure*, dimana tekanan puncak yang terjadi dinyatakan sebagai *Peak reflected pressure* (P_r).

Parameter gelombang ledakan yang perlu dihitung dalam penentuan besarnya beban ledakan pada suatu struktur adalah sebagai berikut:

Shock front velocity, U

$$\begin{aligned} U &= 345 \cdot (1 + 0.0083 \cdot P_{so})^{0.5} \\ &= 345 \cdot (1 + 0.0083 \cdot 70)^{0.5} \\ &= 433.796 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

Length of pressure wave, Lw

$$\begin{aligned} L_w &= U \cdot T_d \\ &= 433.796 \cdot 0.02 \\ &= 8.68 \text{ m} \end{aligned}$$

Peak dynamic wind pressure, qo

$$\begin{aligned} q_o &= 0.0032 \cdot P_{so}^2 \\ &= 0.0032 \cdot 70^2 \\ &= 15.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Desain dinding muka, tipikal untuk tiap 1m lebar.

Clearing distance, S:

$$\begin{aligned} S &= \text{minimum dari nilai } H \text{ atau } B/2 \\ &= 3 \text{ m} \end{aligned}$$

Reflected overpressure clearing time, tc:

$$\begin{aligned} t_c &= 3 (S / U) \\ &= 3 (3 / 433.796) \\ &= 0.021 \text{ sec} \end{aligned}$$

Drag coefficient, Cd:

$$C_d = 1 \text{ (sect. 3.3.3, ASCE report)}$$

Stagnation pressure, Ps:

$$\begin{aligned} P_s &= P_{so} + C_d \cdot q_o \\ &= 70 + 1 \cdot 15.7 \\ &= 85.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Reflected over pressure:

Untuk kebutuhan desain, kondisi normal untuk shock reflection, $\alpha = 0^\circ$, Newmark equation's, $P_r - 1$:

$$\begin{aligned} P_r - 1 &= (2 + 0.0073 P_{so}) \cdot P_{so} \\ &= (2 + 0.0073 \cdot 70) \cdot 70 \\ &= 175.77 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Dengan mempertimbangkan arah sudut refleksi dari tekanan *overpressure* dengan variasi dari 0° to 90°

Average ambient atmospheric pressure,

$$P_o = 754 \text{ mm}$$

$$H_g = 100 \text{ kPa}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} P_s / P_o &= (85.7 / 100) \\ &= 0.857 \end{aligned}$$

Berdasarkan gambar 3.2 pada ASCE Report, nilai maksimum *reflection coefficient*, C_r untuk *tipe shock waves*:

$$C_r = 2.6 \text{ untuk sudut } 0^\circ$$

$$\begin{aligned} P_r - 2 &= C_r \cdot P_{so} \\ &= 2.6 \cdot 70 \\ &= 182 \text{ kPa (govern)} \end{aligned}$$

Impulse pada dinding muka, Iw:

$$\begin{aligned} I_w &= 0.5 (P_r - P_s) \cdot t_c + 0.5 \cdot P_s \cdot t_d \\ &= 0.5 (182 - 85.7) \cdot 0.021 + 0.5 \cdot 85.7 \\ &\quad \cdot 0.02 \\ &= 1.87 \text{ kPa}\cdot\text{sec} \end{aligned}$$

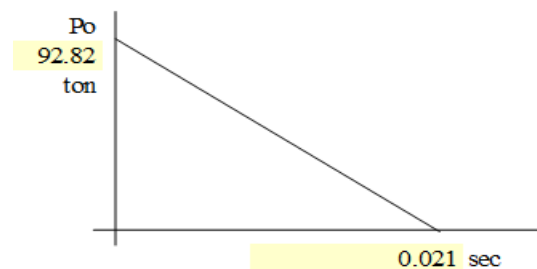
Durasi efektif, t_e :

$$\begin{aligned} t_e &= 2 \cdot I_w / P_r \\ &= 2 \cdot (1.87 / 182) \\ &= 0.021 \text{ sec} \end{aligned}$$

Beban puncak, P_o :

$$\begin{aligned} P_o &= 5 \cdot 1 \cdot 182 \cdot 102 \text{ kg/m}^2 \\ &= 92820 \text{ kg} \\ &= 92.82 \text{ ton} \end{aligned}$$

Beban ledakan yang bekerja pada arah tegak lurus dinding muka bangunan dapat digambarkan dalam bentuk kurva beban sebagai berikut.



Gambar 11. Kurva Beban Ledakan Dinding Muka

Menghitung tahanan lentur

Tebal dinding = 40 cm
 Dia. tulangan dinding muka = 2.2 cm
 Jarak antar tulangan = 20 cm

Dalam melakukan analisa perhitungan kapasitas lentur saat kondisi dinamis, ASCE appendix 5.A merekomendasikan koefisien sebagai berikut:

strength Increase Factor (SIF):

- beton = 1
- tulangan baja = 1.1

Dynamic increase factor (DIF):

- Tegangan lentur pada beton = 1.19
- Tegangan lentur pada tul. Baja = 1.17

Sehingga tahanan lentur saat kondisi dinamis (*dynamic bending*) dapat diperoleh sebagai berikut:

$$f_{dy} = SIF \times DIF \times F_y$$

$$= 1.1 \times 1.17 \times 420$$

$$= 540.54 \text{ MPa}$$

$$f'_{dc} = SIF \times DIF \times F'_c$$

$$= 1 \times 1.19 \times 30$$

$$= 35.7 \text{ MPa}$$

$$b = 100 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 4 - 2.2 / 2$$

$$= 34.9 \text{ cm}$$

$$A_s = 3.81 \times (100 / 20)$$

$$= 19.05 \text{ cm}^2 \text{ per m width}$$

$$\rho = A_s / (b \times d)$$

$$= 19.05 / (100 \times 34.9)$$

$$= 0.006 > 0.0018 \text{ (OK)}$$

$$a = A_s \times f_{dy} / (0.85 \times f'_{dc} \times b)$$

$$= 19.05 \times 540.54 \times 100 / (0.85 \times 35.7 \times 100 \times 100)$$

$$= 3.4 \text{ cm}$$

$$M_p = M_n = A_s \times f_{dy} (d - a/2)$$

$$= 19.05 \times 540.54 \times 100 \times (34.9 - 3.4/2)$$

$$= 34186992.84 \text{ cm-N}$$

$$= 34.19 \text{ m-ton}$$

$$R_b = 8 \times M_p / L$$

$$= 8 \times 34.187 / 8$$

$$= 45.58 \text{ ton}$$

Menghitung tahanan geser

Untuk tahanan geser dinamis, dapat dihitung sebagai berikut:

$$f'_{dc} = SIF \times DIF \times f'_c$$

$$= 1 \times 1.1 \times 30$$

$$= 33 \text{ N/mm}^2$$

$$V_n = 1/6 \times f'_c \times b \times d$$

$$= 1/6 \times 30 \times 1000 \times 349$$

$$= 318.59 \text{ KN}$$

Potongan kritis untuk geser dengan jarak sejauh d dari support dapat dihitung:

$$R_s = V_n \times L / (0.5L - d)$$

$$= 318.592 \times 6 \times 100 / (0.5 \times 6 \times 100 - 34.9)$$

$$= 721.07 \text{ KN} = 72.11 \text{ ton}$$

Untuk menghitung karakter dinamis sistem struktur dapat dihitung menggunakan analisa derajat kebebasan tunggal, (SDOF).

Gross moment of inertia:

$$I_g = 1/12 \cdot B \times h^3$$

$$= 1/12 \times 100 \times 34.9^3$$

$$= 354237.91 \text{ cm}^4$$

Cracked moment of inertia:

$$n \cdot A_s = 7.72 \times 19.05$$

$$= 147.1 \text{ cm}^2$$

$$C = [-n \cdot A_s + [n \cdot A_s (n \cdot A_s + 2 \cdot b \cdot d)]^{0.5}] / b$$

$$= [-147.1 + [147.1(147.1 + 2 \cdot 100 \cdot 34.9)]^{0.5}] / 100$$

$$= 8.77 \text{ cm}$$

$$I_{cr} = 1/3 \times b \times C^3 + n \times A_s (d - C)^2$$

$$= 1/3 \times 100 \times 8.77^3 + 147.1 (34.9 - 8.77)^2$$

$$= 122920.69 \text{ cm}^4$$

Momen inersia rata-rata:

$$I_a = (I_g + I_{cr}) / 2$$

$$= (354237.91 + 122920.69) / 2$$

$$= 238579.3 \text{ cm}^4$$

Effective stiffness, K:

$$K = 384 E \cdot I / 5 \cdot L^3$$

$$= 384 \cdot 2590727.7 \cdot 238579.3 / (5 \cdot (600)^3)$$

$$= 219766.8 \text{ N/cm}$$

$$= 21.98 \text{ ton/cm}$$

Yield deflection:

$$\begin{aligned} Y_e &= R_u / K \\ &= 45.83 / 21.98 \\ &= 2.08 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa balok} &= (2.4 \text{ ton/m}^3 * 0.4 \text{ m tebal} * 1 \text{ m} \\ &\text{lebar} * 6 \text{ m bentang}) / (9.8 \text{ m/sec}^2) \\ &= 0.588 \text{ ton-sec}^2/\text{m} \end{aligned}$$

Rerata nilai KLM:

$$\begin{aligned} \text{Elastic KLM} &= K_M / K_L \text{ elastic} \\ &= 0.5/0.64 \\ &= 0.79 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Plastic KLM} &= K_M / K_L \text{ plastic} \\ &= 0.33/0.5 \\ &= 0.66 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rerata KLM av} &= (0.79+0.66)/ 2 \\ &= 0.725 \end{aligned}$$

Massa equivalen:

$$\begin{aligned} M_e &= K_{lm} \cdot \text{massa balok} \\ &= 0.725 \times 0.588 \\ &= 0.43 \text{ ton-sec}^2/\text{m} \end{aligned}$$

Perioda getar:

$$\begin{aligned} t_n &= 2 \cdot \pi \cdot (M_e/K)^{0.5} \\ &= 2 \times 3.14 \times (0.43 / 2198)^{0.5} \\ &= 0.09 \text{ sec} \end{aligned}$$

Untuk menghitung besarnya defleksi maksimum pada dinding muka dapat digunakan grafik dari Biggs 1964,

$$\mu = 1.2 \text{ (gambar 10.)}$$

$$t_d / t_n = 0.24$$

$$R_u / P_o = 0.49$$

Defleksi maksimal, y_m :

$$\begin{aligned} Y_m &= \mu \cdot Y_e \\ &= 1.2 * 2.08 \\ &= 3.12 \text{ cm} \end{aligned}$$

Support rotation, θ_d :

$$\begin{aligned} \theta_d &= \arctan (y_m / 0.5L) \\ &= \arctan (3.12 / (0.5 * 600)) \\ &= \arctan (0.011) \\ &= 0.6^\circ < 2^\circ \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Variasi nilai PSo terhadap rotasi sudut maksimal dinding sisi muka

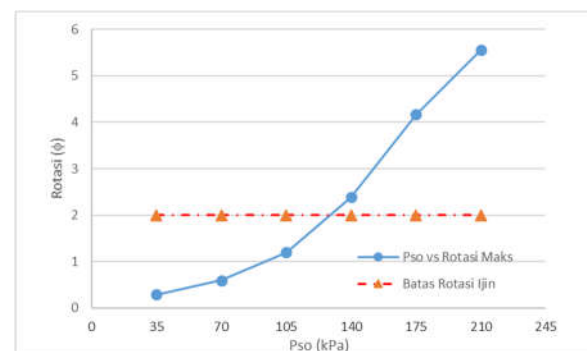
Dengan menggunakan metode perhitungan dan geometri yang sama, jika dilakukan enam (6) variasi besar beban ledakan (PSo)

yaitu 35 kPa, 70 kPa, 105 kPa, 140 kPa, 175 kPa dan 210 kPa dapat diperoleh bahwa dengan ketebalan dinding muka 40cm maka beban PSo dengan besaran 35 kPa, 70 kPa, 105 kPa masih dapat ditahan oleh bangunan dengan respon defleksi yang terjadi secara berurutan adalah 14.98 mm, 31.20 mm, 62.40mm dan jika dirubah ke rotasi sudut ujung dari dinding muka akan diperoleh secara berurutan 0.29°, 0.60°, 1.06°, 1.2°.

Sedangkan respon deformasi dinding dengan beban ledakan Pso sebesar 140 kPa, 175 kPa dan 210 kPa memberikan respon deformasi struktur dengan rotasi sudut 2.39° , 4.17° dan 5.55° yang artinya sudah melebihi kriteria rotasi ijin sesuai performa yang diinginkan yaitu 2°.

Tabel 3. Tabulasi Perhitungan Variasi PSo dan Rotasi Sudut, θ_d (°)

Kondisi	Pso (kPa)	Ym (mm)	θ_d (°)	θ_{iji} (°)	Status
1	35	14.98	0.29	2	OK
2	70	31.2	0.6	2	OK
3	105	62.4	1.2	2	OK
4	140	124.8	2.39	2	Tidak OK
5	175	218.4	4.17	2	Tidak OK
6	210	291.2	5.55	2	Tidak OK



Gambar 12. Grafik PSo vs θ_d

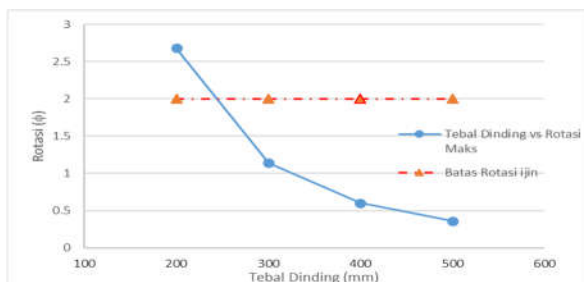
Variasi tebal dinding terhadap rotasi sudut dinding struktur

Dengan menggunakan metode perhitungan dan geometri yang sama, jika dilakukan empat (4) variasi besar tebal dinding yaitu 200 mm, 300 mm, 400 mm, dan 500 mm dan keempat variasi tebal dinding muka tersebut diberikan beban ledakan (PSo) yang sama besarnya yaitu 70 kPa maka dapat diperoleh respon maksimum pada dinding, defleksi maksimum secara berurutan sebesar 140.42 mm, 59.20, 31.20 mm, 18.76 mm dan jika dirubah ke rotasi sudut ujung dinding akan diperoleh secara berurutan 2.68°, 1.14°, 0.6° dan 0.36°.

Dari simulasi penambahan ketebalan dinding muka maka respon berupa defleksi maksimal yang terjadi akan semakin kecil hal ini seiring dengan naiknya kekakuan dari elemen dinding. Pada dinding dengan ketebalan 200 mm diperoleh respon dinding terhadap beban PSo 70 kPa tidak memenuhi syarat batas perputaran rotasi sudut yang diijinkan dari ASCE.

Tabel 4. Tabulasi Perhitungan Variasi Tebal Dinding Muka dan Rotasi Sudut, θ_d (°)

Kondisi	Pso (kPa)	T Dinding (mm)	Ym (mm)	θ_d (°)	θ_{ijin} (°)	Status
1	70	200	140.42	2.68	2	OK
2	70	300	59.2	1.14	2	OK
3	70	400	31.2	0.6	2	OK
4	70	500	18.76	0.36	2	Tidak OK



Gambar 13. Variasi Tebal Dinding vs θ_d

7. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa besaran beban ledakan yang terjadi serta perubahan penebalan dinding muka dapat memberikan respons deformasi yang berbeda-beda pada dinding muka.

Pada desain bangunan tahan ledakan dengan geometri panjang bangunan, B = 12 m, lebar, L = 6 m, Tinggi, H = 5 m. Beban ledakan (PSo) yaitu 35 kPa, 70 kPa, 105 kPa, 140 kPa, 175 kPa dan 210 kPa dapat diperoleh bahwa dengan ketebalan dinding muka 40 cm maka beban PSo dengan besaran 35 kPa, 70 kPa, 105 kPa, masih dapat ditahan oleh bangunan dengan respon defleksi yang terjadi secara berurutan adalah 14.98 mm, 31.20 mm, 62.40 mm dan jika dirubah ke rotasi sudut ujung dari dinding muka akan diperoleh secara berurutan 0.29°, 0.60°, 1.06°, 1.2°.

Sedangkan respon deformasi dinding dengan beban ledakan Pso sebesar 140kPa, 175 kPa dan 210 kPa memberikan respon deformasi struktur dengan rotasi sudut 2.39°, 4.17° dan 5.55° yang artinya sudah melebihi kriteria perubahan bentuk sesuai performa yang diinginkan yaitu 2°

Variasi ketebalan dinding muka yaitu 200 mm, 300 mm, 400 mm, dan 500 mm dan dikenai beban ledakan PSo sebesar 70kPa diperoleh defleksi maksimum secara berurutan adalah 140.42 mm, 59.20 mm, 31.20 mm dan 18.76 mm. Jika defleksi tersebut dirubah ke rotasi sudut ujung dinding akan diperoleh secara berurutan 2.68°, 1.14°, 0.6° dan 0.36°. Pada dinding dengan ketebalan 200 mm diperoleh respon dinding terhadap beban PSo 70 kPa tidak memenuhi syarat batas maksimum perputaran rotasi sudut yang diijinkan dari ASCE.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Concrete Institute (ACI), ACI-318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 2011
- [2] ASCE, American society of Civil Engineers, "Design of Blast-Resistance

- Buildings in Petrochemical Facilities”, 2010.
- [3] FEMA 452, Risk Assessment A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, 2005.
- [4] Manmohan Dass Goel and Vasant A. Matsagar, Blast-Resistant Design of Structures, ASCE, 2014.
- [5] Manmohan Dass Goel and Vasant A. Matsagar, An Abridged Review of Blast Wave Parameters, Defence Science Journal · October 2012
- [6] Sabatino Ditalia*, Fulvio Ragnoa, Roberto Fiorea, Jumrianib, Simplified Criteria for the Application of Blast Loads from Accidental Explosions in Plant Design, Chemical Engineering Transactions, 2018
- [7] S.W. Alisjahbana, A.Asmi, Safrilah, J.C.Putra, B.S Gan, I.Alisjahbana “Numerical analysis of a Friedlander Localized Blast Load on Rigid Roadway Pavement Using Levy’s Problem”, 4th International Conference of Civil Engineering Research, 2020
- [8] S W Alisjahbana et al, Dynamic Behavior of Stiffened Orthotropic Plates Subjected to Friedlander Blast Load, 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum, 2021.
- [9] V. Karlos and G. Solomon, Calculation of blast loads for application to structural components, 2013.

