

# Analisis Struktur Atap Gudang C PLTU Suralaya 1-7 Untuk Perencanaan Pemasangan PLTS *On-Grid* dengan Menggunakan *software* SAP2000

M Rizky Adriansyah S<sup>1\*</sup>, Haolia Rahman<sup>2</sup>, Arifia Ekayuliana<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof.  
G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

\*Corresponding author *E-mail address*: muhammad.rizky.adriansyah.saputra.tm25@stu.pnj.ac.id

---

## Abstrak

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid* pada bangunan eksisting merupakan salah satu upaya mendukung pengembangan energi terbarukan. Namun, pemasangan panel surya pada atap bangunan menimbulkan tambahan beban yang perlu dievaluasi terhadap kapasitas struktur eksisting. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan struktur Gudang C PLTU Suralaya 1–7 sebagai lokasi pemasangan PLTS *On-Grid*. Analisis dilakukan melalui perhitungan pembebanan yang meliputi beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, beban angin, dan beban gempa sesuai SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, serta pemodelan struktur menggunakan SAP2000 dengan metode Finite Element Method (FEM). Evaluasi kapasitas struktur dilakukan berdasarkan SNI 1729:2020 untuk memperoleh respons struktur berupa gaya aksial, gaya geser, momen lentur, lendutan, dan reaksi tumpuan. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur Gudang C masih mampu menahan tambahan beban panel surya sebesar 2 kg/m<sup>2</sup> tanpa melampaui kapasitas elemen struktur. Dengan demikian, struktur Gudang C dinyatakan layak untuk mendukung pemasangan sistem PLTS *On-Grid* tanpa memerlukan perkuatan struktur utama.

*Kata kunci* : PLTS *On-Grid*, struktur baja, SAP2000, FEM, evaluasi struktur, energi terbarukan.

## Abstract

The utilization of *On-Grid* Photovoltaic (PV) Systems on existing buildings is one of the efforts to support the transition toward renewable energy. However, installing solar panels on rooftops introduces additional loads that must be evaluated against the capacity of the existing structure. This study aims to assess the structural feasibility of Warehouse C at Suralaya Power Plant Units 1–7 as the installation site for an *On-Grid* PV system. The analysis was carried out by calculating structural loads, including dead loads, additional dead loads, live loads, wind loads, and seismic loads in accordance with SNI 1727:2020 and SNI 1726:2019, followed by three-dimensional structural modeling using SAP2000 based on the Finite Element Method (FEM). The structural capacity was evaluated in accordance with SNI 1729:2020 by analyzing axial forces, shear forces, bending moments, deflections, and support reactions. The results indicate that the existing structure of Warehouse C is capable of supporting an additional solar panel load of up to 2 kg/m<sup>2</sup> without exceeding the allowable capacity of its structural members. Therefore, Warehouse C is considered structurally feasible for the installation of an *On-Grid* PV system without requiring reinforcement of the main structural components.

*Keywords* : *On-Grid* Photovoltaic System, steel structure, SAP2000, Finite Element Method, structural assessment, renewable energy

## 1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta komitmen Indonesia dalam mencapai target bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) mendorong pemanfaatan sumber energi yang ramah lingkungan, salah satunya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sistem PLTS *on-grid* merupakan teknologi yang menghubungkan pembangkit listrik tenaga surya secara langsung dengan jaringan listrik sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal untuk memenuhi kebutuhan beban listrik. Dibandingkan dengan pembangunan PLTS di lahan terbuka, pemasangan PLTS pada atap bangunan (*rooftop photovoltaic*) dinilai lebih efisien karena tidak memerlukan lahan tambahan serta mampu memanfaatkan infrastruktur bangunan yang telah tersedia. Selain itu, implementasi PLTS atap menjadi salah satu strategi konservasi energi dan pengurangan emisi karbon pada sektor industri maupun ketenagalistrikan [1], [2].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Suralaya 1-7 merupakan pembangkit listrik tenaga uap terbesar di Indonesia yang memiliki berbagai fasilitas penunjang operasional, termasuk Gudang C sebagai bangunan penyimpanan material dan peralatan. Luas area atap Gudang C memberikan potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai lokasi pemasangan sistem PLTS *on-grid*. Pemanfaatan atap gudang tersebut diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik internal, mengurangi konsumsi energi dari jaringan eksisting, serta mendukung kebijakan transisi energi menuju sistem kelistrikan yang lebih berkelanjutan. Namun demikian, pemasangan modul fotovoltaik, struktur penyangga (*mounting system*), kabel, dan peralatan pendukung lainnya akan menambah beban mati pada struktur bangunan sehingga diperlukan evaluasi terhadap kapasitas struktur eksisting sebelum instalasi dilakukan [1], [3].

Analisis kelayakan struktur merupakan tahapan yang sangat penting dalam perencanaan pemasangan PLTS atap karena berkaitan langsung dengan aspek keselamatan, keandalan, dan umur layan bangunan. Evaluasi struktur dilakukan dengan meninjau kondisi eksisting bangunan, karakteristik material, dimensi elemen struktur, serta kombinasi pembebanan yang meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban tambahan akibat pemasangan sistem PLTS sesuai ketentuan **SNI 1727:2020**. Hasil evaluasi tersebut menjadi dasar untuk menentukan apakah struktur masih memiliki kapasitas yang mencukupi atau memerlukan penguatan (*retrofitting*) sebelum pemasangan PLTS dilaksanakan [1], [4].

Dalam penelitian ini, analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000, yang merupakan salah satu perangkat lunak analisis dan perancangan struktur berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). SAP2000 memiliki kemampuan untuk memodelkan struktur baja secara tiga dimensi, melakukan analisis berbagai kombinasi pembebanan, serta mengevaluasi respons struktur berupa gaya dalam, tegangan, lendutan, dan rasio utilisasi elemen berdasarkan standar desain yang digunakan. Penggunaan SAP2000 diharapkan dapat memberikan hasil analisis yang lebih akurat sehingga mampu menggambarkan kondisi aktual struktur Gudang C setelah menerima beban tambahan dari instalasi PLTS *on-grid* [5].

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan struktur Gudang C dalam menahan beban tambahan akibat pemasangan PLTS *on-grid* berdasarkan ketentuan SNI 1727:2020 dan SNI 1729:2020 melalui pemodelan menggunakan SAP2000. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan mengenai kelayakan pemasangan PLTS pada Gudang C PLTU Suralaya Unit 1–7, sekaligus menjadi referensi bagi penerapan sistem PLTS atap pada bangunan industri lainnya yang memiliki karakteristik struktur serupa.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik (*numerical simulation*) menggunakan perangkat lunak SAP2000 berbasis Finite Element Method (FEM). Penelitian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan struktur baja eksisting Gudang C PLTU Suralaya 1–7 dalam menerima tambahan beban akibat pemasangan sistem PLTS On-Grid berdasarkan ketentuan SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, dan SNI 1729:2020. Variabel penelitian terdiri atas:

- Variabel bebas (*independent variable*) berupa penambahan beban sistem PLTS On-Grid pada struktur atap yang meliputi berat modul surya, *mounting system*, serta beban pendukung lainnya.
- Variabel terikat (*dependent variable*) berupa respons struktur yang diperoleh dari hasil analisis SAP2000, meliputi gaya aksial, gaya geser, momen lentur, lendutan (*deflection*), reaksi tumpuan, serta rasio utilisasi elemen struktur.

- Variabel kontrol (controlled variable) meliputi dimensi dan profil struktur eksisting, mutu material baja, konfigurasi struktur bangunan, kondisi tumpuan, serta kombinasi pembebanan berdasarkan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019 sehingga selama simulasi parameter tersebut dibuat tetap.

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi data struktur eksisting Gudang C, pengumpulan data dimensi dan material struktur, kemudian dilakukan perhitungan pembebanan yang terdiri atas beban mati, beban mati tambahan akibat PLTS, beban hidup, beban angin, dan beban gempa. Seluruh data tersebut dimodelkan ke dalam SAP2000 untuk membentuk model struktur tiga dimensi menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM).

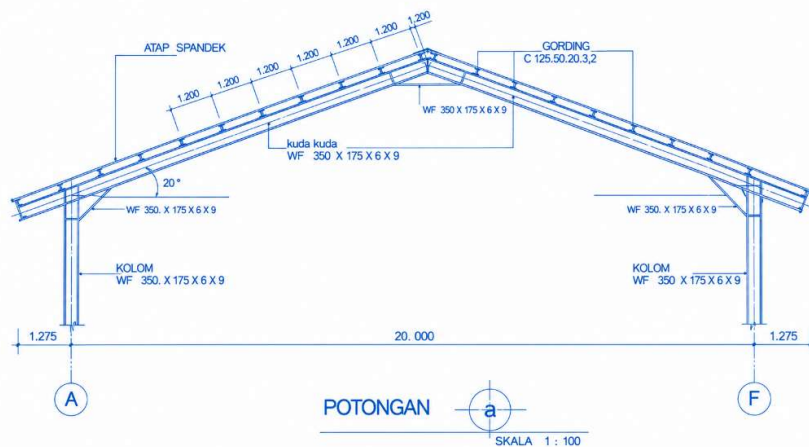
Selanjutnya dilakukan analisis terhadap kombinasi pembebanan sesuai standar yang berlaku untuk memperoleh respons struktur berupa gaya dalam, lendutan, reaksi tumpuan, dan rasio utilisasi setiap elemen struktur.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil simulasi SAP2000 terhadap persyaratan desain struktur baja berdasarkan SNI 1729:2020. Struktur dinyatakan layak apabila seluruh elemen memiliki rasio utilisasi kurang dari satu (unity check  $< 1,0$ ), lendutan masih berada dalam batas yang diizinkan, serta mampu menahan tambahan beban PLTS tanpa melampaui kapasitas desain.

Gambar 1 merupakan potongan desain struktur utama Gudang C yang digunakan sebagai objek analisis dalam perencanaan pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid*. Struktur bangunan menggunakan sistem portal baja (*steel portal frame*) dengan bentang utama sepanjang 20 meter dan memiliki kemiringan sekitar  $20^\circ$ .

Struktur utama terdiri atas kolom baja dan *rafter*/kuda-kuda baja yang menggunakan profil *Wide Flange* (WF)  $350 \times 175 \times 6 \times 9$ . Profil ini berfungsi sebagai elemen utama pemikul beban vertikal maupun horizontal yang bekerja pada bangunan. Di atas *rafter* dipasang *gording* menggunakan profil C  $125 \times 50 \times 20 \times 3,2$  mm dengan jarak antar *gording* sekitar 1,20 meter, yang berfungsi sebagai penyangga penutup atap sekaligus media pemasangan panel surya.

Penutup atap menggunakan material spandek, yang memiliki berat relatif ringan sehingga sesuai untuk sistem PLTS atap (*rooftop photovoltaic*). Panel surya pada sistem PLTS *On-Grid* direncanakan dipasang mengikuti kemiringan atap sehingga tidak memerlukan perubahan geometri struktur eksisting. Beban tambahan yang berasal dari panel surya, mounting system, serta beban pemeliharaan akan diteruskan terlebih dahulu ke *gording*, kemudian disalurkan ke *rafter*, kolom, dan akhirnya ke pondasi.



Gambar 1. Desain Struktur Gudang C PLTU Suralaya 1-7

Dalam perencanaan PLTS *On-Grid*, struktur Gudang C dianalisis terhadap kombinasi beban sesuai SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, yang meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, serta beban gempa. Beban panel surya dimodelkan sebagai tambahan beban mati pada bidang atap sehingga dapat diketahui perubahan gaya dalam berupa gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur pada setiap elemen struktur. Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kelayakan struktur Gudang C terhadap pemasangan sistem PLTS *On-Grid* sesuai persyaratan SNI yang berlaku.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis pembebanan dan simulasi struktur menggunakan SAP2000 disajikan pada bagian ini untuk mengevaluasi kemampuan struktur Gudang C dalam menerima tambahan beban PLTS On-Grid sesuai ketentuan SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, dan SNI 1729:2020.

#### Perhitungan Beban Mati (Dead Load)

Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafond, tangga, dinding partisi, komponen arsitektural lainnya yang terpasang pada gedung. Pada bangunan ini beban mati hanya berada pada bagian atap karena bangunan hanya 1 lantai. Beban mati yang diinputkan adalah :

- Beban Penutup Atap =  $0.055 \text{ kN/m}^2$
- Beban Solar Panel =  $0.019 \text{ kN/m}^2$

#### Beban Hidup (Live Load)

Beban hidup pelat lantai yang bekerja dalam struktur ini berupa beban merata yang besarnya diambil sebesar :

- Beban hidup atap =  $1.00 \text{ kN}$

#### Beban Angin

Beban angin secara dominan bekerja pada atap bangunan dengan penentuan kecepatan angin dasar mengacu pada buku Peta Angin Indonesia dan sesuai Kategori wilayah dimana bangunan direncanakan.

#### Beban Gempa

Tata cara ini menentukan pengaruh gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan nongedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %

##### A. Kategori Resiko dan Faktor Keutamaan Struktur

Kategori resiko dan faktor keutamaan struktur dalam menahan gempa ditentukan berdasarkan pasal 4.1.2 dan tabel 3 SNI 1726-2019 yang diperlihatkan pada tabel 2.1. Khusus untuk struktur bangunan dengan kategori risiko IV, bila dibutuhkan pintu masuk untuk operasional dari struktur bangunan yang bersebelahan, maka struktur bangunan yang bersebelahan tersebut harus didesain sesuai dengan kategori risiko IV.

##### B. Kelas Situs

Kelas situs ditentukan berdasarkan pasal 5.1 SNI 1726-2019 dan tabel 1, yang parameternya berupa data pengujian tanah yang dilakukan laboratorium resmi / berbadan hukum resmi. Kedalaman pengujian tanah minimum yang dipersyaratkan adalah 30 meter, sehingga jika pengujian tidak mencapai 30 meter maka kelas situs tanah ditetapkan sebagai tanah lunak (SE). Pada perencanaan ini digunakan kelas situs SE karena data tanah tidak spesifik sampai dengan 30 meter.

Tabel 1. Tabel Kelas Situs

| Kelas situs                                                                                                                                                                                                                         | $\bar{v}_s$ (m/detik)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$ | $s_w$ (kPa)   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| SA (batuan keras)                                                                                                                                                                                                                   | >1500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | N/A                           | N/A           |
| SB (batuan)                                                                                                                                                                                                                         | 750 sampai 1500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | N/A                           | N/A           |
| SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)                                                                                                                                                                                     | 350 sampai 750                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | >50                           | $\geq 100$    |
| SD (tanah sedang)                                                                                                                                                                                                                   | 175 sampai 350                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 15 sampai 50                  | 50 sampai 100 |
| SE (tanah lunak)                                                                                                                                                                                                                    | < 175                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <15                           | < 50          |
| Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :<br>1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ ,<br>2. Kadar air, $w \geq 40\%$ ,<br>3. Kuat geser nirair $\bar{s}_{ir} < 25 \text{ kPa}$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                               |               |
| SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 6.10.1)                                                                                                        | Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:<br>- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah teresementasi lemah<br>- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 \text{ m}$ )<br>- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5 \text{ m}$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$ )<br>Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35 \text{ m}$ dengan $\bar{s}_{ir} < 50 \text{ kPa}$ |                               |               |

CATATAN: N/A = tidak dapat dipakai

## C. Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Biasa

Tabel 2. Tabel Sistem rangka baja pemikul

| Sistem pemikul gaya seismik                                                                                                                            | Koefisien modifikasi respons, $R^a$ | Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0^b$ | Faktor pembesaran defleksi, $C_d^c$ | Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n$ (m) <sup>d</sup> |    |                 |                 |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                                                                        |                                     |                                        |                                     | Kategori desain seismik                                                     |    |                 |                 |                 |
|                                                                                                                                                        |                                     |                                        |                                     | B                                                                           | C  | D <sup>e</sup>  | E <sup>e</sup>  | F <sup>f</sup>  |
| 19. Dinding geser batu bata polos didetail                                                                                                             | 2                                   | 2½                                     | 2                                   | TB                                                                          | TI | TI              | TI              | TI              |
| 20. Dinding geser batu bata polos biasa                                                                                                                | 1½                                  | 2½                                     | 1½                                  | TB                                                                          | TI | TI              | TI              | TI              |
| 21. Dinding geser batu bata prategang                                                                                                                  | 1½                                  | 2½                                     | 1½                                  | TB                                                                          | TI | TI              | TI              | TI              |
| 22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser                                         | 7                                   | 2½                                     | 4½                                  | TB                                                                          | TB | 22              | 22              | 22              |
| 23. Dinding rangka ringan (baja canal dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja | 7                                   | 2½                                     | 4½                                  | TB                                                                          | TB | 22              | 22              | 22              |
| 24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya                                                                               | 2½                                  | 2½                                     | 2½                                  | TB                                                                          | TB | 10              | TB              | TB              |
| 25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk                                                                                                | 8                                   | 2½                                     | 5                                   | TB                                                                          | TB | 48              | 48              | 30              |
| 26. Dinding geser pelat baja khusus                                                                                                                    | 7                                   | 2                                      | 6                                   | TB                                                                          | TB | 48              | 48              | 30              |
| <b>C. Sistem rangka pemikul momen</b>                                                                                                                  |                                     |                                        |                                     |                                                                             |    |                 |                 |                 |
| 1. Rangka baja pemikul momen khusus                                                                                                                    | 8                                   | 3                                      | 5½                                  | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |
| 2. Rangka batang baja pemikul momen khusus                                                                                                             | 7                                   | 3                                      | 5½                                  | TB                                                                          | TB | 48              | 30              | TI              |
| 3. Rangka baja pemikul momen menengah                                                                                                                  | 4½                                  | 3                                      | 4                                   | TB                                                                          | TB | 10 <sup>h</sup> | TI <sup>i</sup> | TI <sup>k</sup> |
| 4. Rangka baja pemikul momen biasa                                                                                                                     | 3½                                  | 3                                      | 3                                   | TB                                                                          | TB | TI <sup>j</sup> | TI <sup>j</sup> | TI <sup>j</sup> |
| 5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus <sup>m</sup>                                                                                            | 8                                   | 3                                      | 5½                                  | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |
| 6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah                                                                                                       | 5                                   | 3                                      | 4½                                  | TB                                                                          | TB | TI              | TI              | TI              |
| 7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa                                                                                                          | 3                                   | 3                                      | 2½                                  | TB                                                                          | TI | TI              | TI              | TI              |
| 8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus                                                                                                 | 8                                   | 3                                      | 5½                                  | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |
| 9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah                                                                                               | 5                                   | 3                                      | 4½                                  | TB                                                                          | TB | TI              | TI              | TI              |
| 10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen                                                                                     | 6                                   | 3                                      | 5½                                  | 48                                                                          | 48 | 30              | TI              | TI              |
| 11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa                                                                                                 | 3                                   | 3                                      | 2½                                  | TB                                                                          | TI | TI              | TI              | TI              |
| 12. Rangka baja canal dingin pemikul momen khusus dengan pembautan <sup>n</sup>                                                                        | 3½                                  | 3 <sup>a</sup>                         | 3½                                  | 10                                                                          | 10 | 10              | 10              | 10              |
| <b>D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan</b>                          |                                     |                                        |                                     |                                                                             |    |                 |                 |                 |
| 1. Rangka baja dengan bresing eksentris                                                                                                                | 8                                   | 2½                                     | 4                                   | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |
| 2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus                                                                                                        | 7                                   | 2½                                     | 5½                                  | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |
| 3. Dinding geser beton bertulang khusus <sup>g,h</sup>                                                                                                 | 7                                   | 2½                                     | 5½                                  | TB                                                                          | TB | TB              | TB              | TB              |

Berdasarkan pasal 7.2.5.6.1 SNI 1726-2019. Struktur rangka baja pemikul momen biasa satu tingkat yang didesain untuk kategori desain seismik D atau E, diizinkan memiliki tinggi struktur,  $h_n$ , sampai 20 m apabila beban mati yang ditanggungnya dan tributari beban atapnya tidak melebihi 0,96 kN/m<sup>2</sup>. Sehingga dalam perencanaan ini digunakan SRPMB dengan nilai  $R = 3.5$ ,  $\Omega_0 = 3$  dan  $C_d = 3$ .

**Kombinasi Pembebanan Struktur Atas**

kombinasi beban ultimit (strength combinations) yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas elemen struktur atas, seperti gording, rafter, balok, dan kolom. Kombinasi ini mempertimbangan berbagai kemungkinan arah pembebanan gempa, yaitu arah positif dan negatif pada sumbu X maupun Y, termasuk kombinasi 100% gaya gempa pada satu arah ditambah 30% gaya gempa pada arah ortogonal sebagaimana dipersyaratkan dalam SNI 1726:2019. Hal ini bertujuan agar kondisi pembebanan paling kritis dapat teridentifikasi pada setiap elemen struktur.

Elemen struktur kolom, balok dan pelat lantai beton dihitung menggunakan kombinasi beban ultimit (beban puncak) sebagai berikut

SDS = percepatan desain periode pendek

$\rho$  = faktor redundansi

$U_1 = 1,4 \text{ DL} + 1,4 \text{ SDL}$

$U_2 = 1,2 \text{ DL} + 1,2 \text{ SDL} + 1,6 \text{ LL}$

$U_3 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} + \rho \text{ Ex} + 0,3 \rho \text{ Ey}$

$U_4 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} + \rho \text{ Ex} - 0,3 \rho \text{ Ey}$

$U_5 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} - \rho \text{ Ex} + 0,3 \rho \text{ Ey}$

$U_6 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} - \rho \text{ Ex} - 0,3 \rho \text{ Ey}$

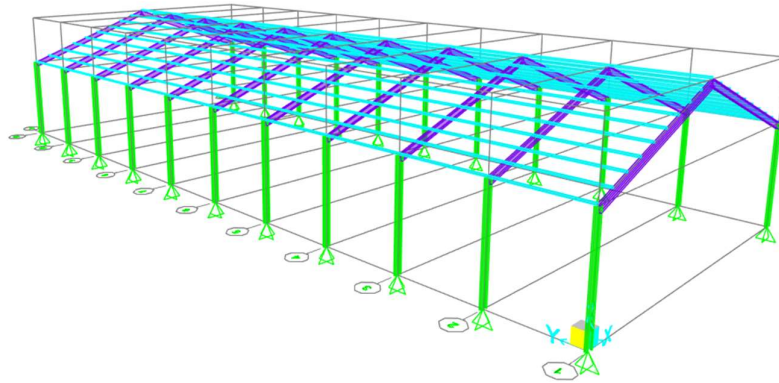
$U_7 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} + 0,3 \rho \text{ Ex} + \rho \text{ Ey}$

$U_8 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} - 0,3 \rho \text{ Ex} + \rho \text{ Ey}$

$U_9 = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} + 0,3 \rho \text{ Ex} - \rho \text{ Ey}$

$U_{10} = (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (1,2 + 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 1,0 \text{ LL} - 0,3 \rho \text{ Ex} - \rho \text{ Ey}$

$$\begin{aligned}
 U11 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + \rho \text{ Ex} + 0,3 \rho \text{ Ey} \\
 U12 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + \rho \text{ Ex} - 0,3 \rho \text{ Ey} \\
 U13 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} - \rho \text{ Ex} + 0,3 \rho \text{ Ey} \\
 U14 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} - \rho \text{ Ex} - 0,3 \rho \text{ Ey} \\
 U15 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 0,3 \rho \text{ Ex} + \rho \text{ Ey} \\
 U16 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} - 0,3 \rho \text{ Ex} + \rho \text{ Ey} \\
 U17 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 0,3 \rho \text{ Ex} - \rho \text{ Ey} \\
 U18 &= (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0,9 - 0,2 \text{ SDS}) \text{ SDL} - 0,3 \rho \text{ Ex} - \rho \text{ Ey}
 \end{aligned}$$



Gambar 2. Pemodelan pembebanan struktur atas menggunakan SAP 2000

#### Kombinasi Pembebanan Struktur Bawah

Kombinasi digunakan untuk analisis pondasi dan pemeriksaan struktur bawah. Kombinasi ini merupakan kombinasi beban layan (*service load combinations*) yang bertujuan memperoleh reaksi tumpuan, gaya aksial pondasi, serta tekanan tanah tanpa memperbesar beban sebagaimana pada kombinasi ultimit. Kombinasi ini digunakan dalam evaluasi daya dukung pondasi dan distribusi reaksi yang diteruskan ke tanah.

Elemen pondasi dihitung menggunakan kombinasi beban layan sebagai berikut :

SDS = percepatan desain periode pendek

$\rho$  = faktor redundansi

P1 = 1.00 DL + 1.00 SDL

P2 = 1.00 DL + 1.00 SDL + 1.00 LL

P3 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL + 0.7 $\rho$  Ex + 0.21  $\rho$  Ey

P4 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL + 0.7 $\rho$  Ex - 0.21  $\rho$  Ey

P5 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL - 0.7 $\rho$  Ex - 0.21  $\rho$  Ey

P6 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL - 0.7 $\rho$  Ex + 0.21  $\rho$  Ey

P7 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL + 0.21 $\rho$  Ex + 0.70  $\rho$  Ey

P8 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL + 0.21 $\rho$  Ex - 0.70  $\rho$  Ey

P9 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL - 0.21 $\rho$  Ex - 0.70  $\rho$  Ey

P10 = (1.00 + 0.14 SDS) DL + (1.00 + 0.14 SDS) SDL - 0.21 $\rho$  Ex + 0.70  $\rho$  Ey

P11 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL + 0.525  $\rho$ Ex + 0.157 $\rho$  Ey

P12 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL + 0.525  $\rho$ Ex - 0.157 $\rho$  Ey

P13 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL - 0.525  $\rho$ Ex - 0.157 $\rho$  Ey

P14 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL - 0.525  $\rho$ Ex + 0.157 $\rho$  Ey

P15 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL + 0.157  $\rho$ Ex + 0.525 $\rho$  Ey

P16 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL + 0.157  $\rho$ Ex - 0.525 $\rho$  Ey

P17 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL - 0.157  $\rho$ Ex - 0.525 $\rho$  Ey

P18 = (1.00 + 0.10 SDS) DL + (1.00 + 0.10 SDS) SDL + 0.75LL - 0.157  $\rho$ Ex + 0.525 $\rho$  Ey

P19 = (0.6 - 0.14 SDS) DL + (0.6 - 0.14 SDS) SDL + 0.7 $\rho$  Ex + 0.21  $\rho$  Ey

P20 = (0.6 - 0.14 SDS) DL + (0.6 - 0.14 SDS) SDL + 0.7 $\rho$  Ex - 0.21  $\rho$  Ey

P21 = (0.6 - 0.14 SDS) DL + (0.6 - 0.14 SDS) SDL - 0.7 $\rho$  Ex - 0.21  $\rho$  Ey

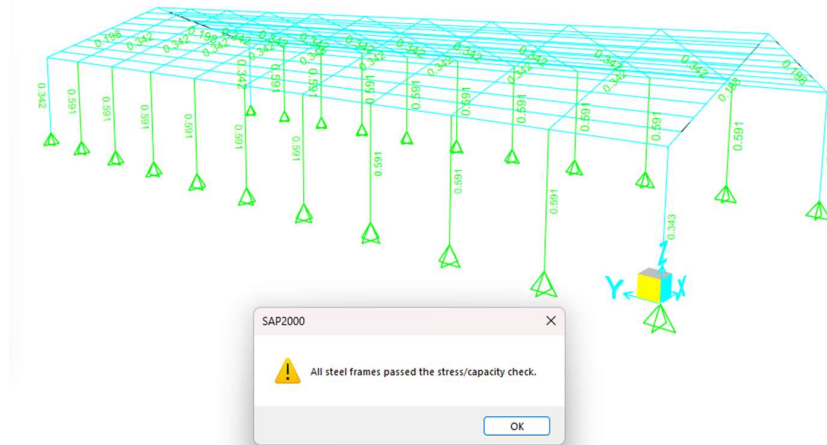
P22 = (0.6 - 0.14 SDS) DL + (0.6 - 0.14 SDS) SDL - 0.7 $\rho$  Ex + 0.21  $\rho$  Ey

P23 = (0.6 - 0.14 SDS) DL + (0.6 - 0.14 SDS) SDL + 0.21 $\rho$  Ex + 0.7  $\rho$  Ey

$$P24 = (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ SDL} + 0.21 \rho \text{ Ex} - 0.7 \rho \text{ Ey}$$

$$P25 = (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ SDL} - 0.21 \rho \text{ Ex} - 0.7 \rho \text{ Ey}$$

$$P26 = (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ DL} + (0.6 - 0.14 \text{ SDS}) \text{ SDL} - 0.21 \rho \text{ Ex} + 0.7 \rho \text{ Ey}$$



Gambar 3. Pemodelan pembebanan struktur bawah menggunakan SAP 2000

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur eksisting Gudang C masih memiliki kapasitas yang memadai untuk menerima tambahan beban PLTS sebesar  $2 \text{ kg/m}^2$ . Hal ini ditunjukkan oleh nilai gaya dalam dan rasio utilisasi seluruh elemen struktur yang masih berada di bawah batas kapasitas desain berdasarkan SNI 1729:2020.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Priyanto dan Hermawan (2025) yang menyatakan bahwa struktur baja yang dianalisis menggunakan SAP2000 dengan kombinasi pembebanan sesuai SNI masih mampu mempertahankan tingkat keamanan selama rasio utilisasi elemen lebih kecil dari satu. Selain itu, penelitian mengenai evaluasi struktur PLTS atap juga menunjukkan bahwa tambahan beban modul surya relatif kecil dibandingkan kapasitas struktur baja industri sehingga umumnya tidak memerlukan perkuatan apabila struktur awal dirancang sesuai standar.

Secara teoritis, penambahan beban mati dari sistem PLTS akan meningkatkan gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur pada elemen struktur. Namun karena besar tambahan beban hanya sekitar  $0,019 \text{ kN/m}^2$ , peningkatan respons struktur masih berada dalam batas aman sehingga tidak menyebabkan perubahan signifikan terhadap perilaku struktur.

Dari sisi praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Gudang C PLTU Suralaya memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai lokasi pemasangan PLTS atap tanpa memerlukan modifikasi struktur utama. Temuan ini dapat menjadi acuan dalam pengembangan PLTS atap pada bangunan industri lain yang memiliki karakteristik struktur serupa sehingga proses implementasi dapat dilakukan dengan biaya yang lebih efisien tanpa mengurangi aspek keselamatan struktur.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Analisis pembebanan dilakukan dengan mempertimbangkan beban mati, beban mati tambahan dari sistem PLTS, beban hidup, serta beban gempa sesuai ketentuan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019. Seluruh kombinasi pembebanan dimodelkan menggunakan SAP2000 sehingga diperoleh kondisi pembebanan yang paling kritis pada struktur atas maupun struktur bawah.
2. Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan SAP2000, struktur eksisting Gudang C mampu menahan tambahan beban sistem PLTS sebesar  $2 \text{ kg/m}^2$  tanpa melampaui kapasitas elemen struktur berdasarkan SNI 1729:2020.
3. Penerapan kombinasi pembebanan sesuai standar serta evaluasi kapasitas menggunakan SAP2000 memberikan tingkat keandalan yang memadai dalam menilai kelayakan struktur bangunan eksisting.

## REFERENSI

1. Badan Standardisasi Nasional. 2020. *SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta.
2. Badan Standardisasi Nasional. 2020. *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta.
3. Badan Standardisasi Nasional. 2019. *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta.
4. Badan Standardisasi Nasional. 2017. *SNI 8395:2017 Panduan Kelayakan Pembangunan PLTS Fotovoltaik*. Jakarta.
5. Computers and Structures, Inc. 2024. *SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design* (Version 26). Berkeley, California.
6. American Institute of Steel Construction (AISC). 2017. *Steel Construction Manual* (15th ed.). Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
7. Priyanto, M.B., & Hermawan, H. 2025. *Perencanaan dan Analisis Struktur Gangway Rangka Baja Metode LRFD*.
8. Prew, J. **2022**. *A Guide to Assessing Existing Roofs for the Addition of Solar Panels*. The Structural Engineer, 100(4), 24–28.
9. Mendes, S., Ellowitz, J., & Xu, H. **2022**. *Evaluation of Existing Buildings for Feasibility of Photovoltaic Array Installation*. In Proceedings of the ASCE Forensic Engineering Congress 2022, pp. 69–79. American Society of Civil Engineers.
10. IEA PVPS. 2023. *Performance of New Photovoltaic System Designs*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS).