Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim
Volume 5, Nomor 3, September 2026
E-ISSN: 2963-5454; p-ISSN: 2963-5012, Hal. 75-87
DOI: https://doi.org/10.58192/ocean.v5i3.5541
Tersedia: https://journal.unimar-amni.ac.id/index.php/ocean

Analisis Pengaruh Penambahan Solar Panel pada Bangunan Warehouse terhadap Kinerja Pre Engineered Building

Roguard Lubis[1*], Rachmi Yanita[2]
[1-2] Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Indonesia, Indonesia
Email: kokat182@gmail.com[1], rachmi.yanita@iti.ac.id[2]

[*]*Penulis Korespondensi:* kokat182@gmail.com

Abstract. *The integration of renewable energy systems, particularly rooftop solar panels, in industrial buildings has increased as part of efforts to improve energy efficiency and sustainability. However, the installation of solar panels on a Pre-Engineered Building (PEB) introduces additional permanent loads that may affect structural performance. This study aims to evaluate the effect of solar panel installation on the structural performance of a PEB warehouse in Medan. The analysis was conducted by comparing the existing structural condition with the condition after the addition of a solar panel load of 0.15 kN/m². A structural model was developed using structural analysis software, while the evaluation considered the utilization ratio (UR) of selected structural members, including the main column, rafter haunch, roof purlin, rafter mid span, and end wall column. The results indicate that solar panel installation increases the utilization ratio of all evaluated structural members. The roof purlin experienced the highest increase, from 0.74 to 0.91, corresponding to 22.97%, while the rafter haunch showed the lowest increase of 11.54%. The critical structural member also shifted from the main column in the existing condition (UR = 0.79) to the roof purlin after solar panel installation (UR = 0.91). Nevertheless, the maximum utilization ratio remains below 1.00, indicating that the evaluated structural members remain within their design capacity. The findings demonstrate that rooftop solar panel installation can be implemented on PEB structures with appropriate structural assessment and load evaluation.*

Keywords: *Pre-Engineered Building; Solar Panels; Steel Structure; Utilization Ratio; Warehouse.*

Abstrak. *Integrasi sistem energi terbarukan, khususnya panel surya pada atap bangunan industri, semakin berkembang sebagai upaya meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan. Namun, pemasangan panel surya pada bangunan Pre-Engineered Building (PEB) menimbulkan tambahan beban permanen yang dapat memengaruhi kinerja struktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan panel surya terhadap kinerja struktur PEB pada bangunan warehouse di Medan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi struktur eksisting dengan kondisi setelah penambahan beban panel surya sebesar 0,15 kN/m². Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis struktur dengan mengevaluasi utilization ratio (UR) pada elemen Main Column, Rafter Haunch, Roof Purlin, Rafter Mid Span, dan End Wall Column. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan panel surya meningkatkan utilization ratio pada seluruh elemen yang ditinjau. Peningkatan terbesar terjadi pada Roof Purlin, yaitu dari 0,74 menjadi 0,91 atau sebesar 22,97%, sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada Rafter Haunch sebesar 11,54%. Selain itu, elemen paling kritis berubah dari Main Column pada kondisi eksisting dengan UR sebesar 0,79 menjadi Roof Purlin dengan UR sebesar 0,91 setelah penambahan panel surya. Meskipun terjadi peningkatan utilisasi, nilai UR maksimum tetap di bawah 1,00, sehingga elemen yang dianalisis masih memenuhi kapasitas desain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan panel surya pada struktur PEB dapat diterapkan dengan tetap mempertimbangkan evaluasi beban dan kinerja struktur secara menyeluruh.*

Kata kunci: *Gudang; Panel Surya; PEB; Pemanfaatan Struktur; Struktur Baja.*

1. LATAR BELAKANG

Peningkatan kebutuhan energi pada sektor industri mendorong penerapan sumber energi terbarukan sebagai bagian dari upaya meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasional bangunan. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah sistem fotovoltaik (solar photovoltaic/PV) yang dipasang pada atap bangunan. Pemanfaatan atap sebagai lokasi pemasangan panel surya memberikan keuntungan karena tidak memerlukan tambahan lahan dan dapat memanfaatkan area bangunan yang telah tersedia. Dalam konteks bangunan industri,

Naskah Masuk: 30 Juli 2026; Revisi: 25 Agustus 2026; Diterima: 18 September 2026; Terbit: 22 September 2026

warehouse memiliki potensi yang cukup besar untuk penerapan sistem tersebut karena umumnya mempunyai area atap yang luas dan relatif terbuka. Penelitian mengenai kelayakan pemasangan panel surya pada bangunan warehouse menunjukkan bahwa integrasi PV dapat dilakukan dengan tetap memperhatikan kemampuan struktur dalam menerima tambahan beban (Sari & Pratiwi, 2024).

Salah satu sistem struktur yang banyak digunakan untuk bangunan industri dan warehouse adalah Pre-Engineered Building (PEB). Sistem PEB menggunakan rangka baja yang dirancang dan diproduksi secara terintegrasi sehingga dapat menghasilkan struktur yang efisien dari sisi penggunaan material, waktu pelaksanaan, dan kemampuan menyediakan ruang dengan bentang yang relatif besar. Karakteristik tersebut menjadikan PEB sesuai untuk bangunan industri yang membutuhkan ruang luas dengan jumlah kolom interior yang minimal. Kajian mengenai sistem PEB juga menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan material dan konfigurasi elemen menjadi salah satu karakteristik utama dalam perancangan bangunan jenis ini (Kavitha et al., 2023).

Meskipun memiliki keunggulan dalam efisiensi struktur, sistem PEB perlu mendapatkan perhatian ketika mengalami perubahan kondisi pembebanan. Pemasangan panel surya pada atap bangunan eksisting menghasilkan tambahan beban permanen yang berasal dari berat modul PV, sistem mounting, serta komponen pendukung lainnya. Beban tersebut bekerja pada elemen atap dan selanjutnya diteruskan melalui roof purlin, rafter, kolom, hingga ke fondasi. Oleh karena itu, penambahan panel surya berpotensi meningkatkan gaya internal dan tingkat utilisasi kapasitas elemen struktur. Evaluasi terhadap bangunan eksisting yang menerima tambahan beban PV menunjukkan bahwa pemasangan panel surya dapat mengubah respons struktur dan perlu diverifikasi terhadap kapasitas struktur yang tersedia (Mostofi et al., 2020).

Selain tambahan beban gravitasi, keberadaan panel surya pada atap juga dapat memengaruhi respons struktur terhadap beban lingkungan, khususnya beban angin. Konfigurasi, kemiringan, posisi, dan susunan panel dapat memengaruhi distribusi tekanan angin serta gaya angkat (uplift) yang bekerja pada sistem PV dan elemen pendukungnya. Penelitian eksperimental dan numerik mengenai beban angin pada panel surya atap menunjukkan bahwa interaksi antara bangunan dan susunan panel dapat menghasilkan variasi beban angin yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi struktur (Peng et al., 2023; Peng et al., 2025). Dengan demikian, penambahan PV pada bangunan eksisting tidak hanya dapat dipandang sebagai penambahan berat pada atap, tetapi juga sebagai perubahan kondisi pembebanan yang perlu dievaluasi secara menyeluruh.

Dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan di Indonesia, pembebanan harus mengacu pada ketentuan yang berlaku. SNI 1727:2020 menetapkan ketentuan mengenai beban minimum dan kriteria pembebanan untuk bangunan gedung dan struktur lainnya, sedangkan kemampuan elemen struktur baja dapat dievaluasi berdasarkan SNI 1729:2020. Untuk aspek ketahanan gempa, ketentuan yang relevan mengacu pada SNI 1726:2019. Penggunaan standar tersebut diperlukan agar evaluasi struktur mempertimbangkan kondisi pembebanan dan kriteria desain yang sesuai dengan persyaratan teknis yang berlaku (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2019, 2020a, 2020b).

Penelitian terdahulu telah membahas kelayakan pemasangan panel surya pada struktur bangunan eksisting. Sari dan Pratiwi (2024) melakukan evaluasi pada beberapa bangunan warehouse dan menunjukkan bahwa penambahan beban PV menyebabkan peningkatan gaya internal pada elemen struktur, meskipun rasio kapasitas elemen masih berada di bawah batas yang dipersyaratkan. Sementara itu, Mostofi et al. (2020) menunjukkan bahwa jenis dan konfigurasi panel PV dapat memengaruhi respons struktur atap eksisting terhadap tambahan beban. Hasil penelitian tersebut menunjukkan pentingnya melakukan pemeriksaan struktur sebelum pemasangan sistem PV dilakukan.

Namun demikian, kajian yang secara khusus membahas perubahan tingkat kritis elemen struktur PEB akibat penambahan beban panel surya pada bangunan warehouse masih perlu dikembangkan. Evaluasi tidak hanya diperlukan untuk mengetahui apakah struktur masih memenuhi kapasitas, tetapi juga untuk mengidentifikasi elemen yang mengalami peningkatan utilization ratio paling besar serta perubahan elemen yang menjadi paling kritis setelah pemasangan PV. Informasi tersebut penting karena elemen yang sebelumnya tidak menjadi elemen kritis dapat mengalami peningkatan utilisasi yang lebih besar akibat perubahan jalur distribusi beban.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penambahan panel surya terhadap kinerja struktur Pre-Engineered Building pada bangunan warehouse di Medan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi struktur eksisting dengan kondisi setelah pemasangan panel surya dengan tambahan beban sebesar 0,15 kN/m². Parameter yang dievaluasi meliputi gaya aksial (P_u), momen lentur (M_u), gaya geser (V_u), defleksi, dan utilization ratio (UR). Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan respons struktur, tingkat peningkatan utilisasi kapasitas, serta elemen yang menjadi paling kritis setelah penambahan panel surya.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam proses evaluasi bangunan PEB eksisting yang akan dipasangi sistem PV. Selain memberikan informasi mengenai kemampuan struktur dalam menerima tambahan beban, penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan bagi perencana dan pemilik bangunan dalam menerapkan teknologi energi terbarukan pada bangunan industri dengan tetap memperhatikan aspek keselamatan, keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan struktur.

2. KAJIAN TEORITIS

Pre-Engineered Building (PEB)

Pre-Engineered Building (PEB) merupakan sistem bangunan baja yang elemen strukturnya dirancang secara terintegrasi berdasarkan kebutuhan geometrik, pembebanan, dan fungsi bangunan. Komponen utama PEB umumnya terdiri atas kolom, rafter, roof purlin, side girt, bracing, serta elemen sambungan. Sistem tersebut banyak digunakan pada bangunan industri dan warehouse karena mampu menghasilkan bentang yang relatif besar dengan penggunaan material yang efisien. Kajian mengenai PEB menunjukkan bahwa efisiensi sistem tersebut berkaitan dengan penggunaan elemen baja yang disesuaikan terhadap distribusi gaya sepanjang struktur. Elemen utama dapat menggunakan penampang yang berubah atau built-up tapered section, sehingga material dapat ditempatkan pada daerah yang membutuhkan kapasitas lebih besar. Konsep tersebut memberikan keuntungan terhadap berat struktur dan efisiensi konstruksi dibandingkan penggunaan penampang seragam pada seluruh elemen (Sah et al., 2023).

Pada bangunan warehouse, sistem PEB umumnya bekerja sebagai rangka portal pada arah transversal, sedangkan sistem bracing pada bidang atap dan dinding berfungsi membantu menahan gaya lateral pada arah longitudinal. Analisis struktur PEB perlu mempertimbangkan beban gravitasi dan lateral serta kombinasi pembebanan yang sesuai. Penelitian Kavitha et al. (2023) menunjukkan bahwa analisis warehouse menggunakan STAAD.Pro dapat digunakan untuk mengevaluasi gaya aksial, gaya tekan, momen lentur, serta utilization factor pada elemen struktur.

Penelitian Nerlekar dan Radhika (2024) juga menunjukkan bahwa konfigurasi kemiringan atap dan sistem bracing berpengaruh terhadap respons struktur PEB terhadap beban lateral. Parameter seperti momen lentur, perpindahan, gaya geser dasar, berat baja, dan utilization ratio dapat digunakan untuk membandingkan kinerja berbagai konfigurasi PEB.

Struktur Warehouse Baja

Warehouse membutuhkan ruang terbuka yang luas sehingga umumnya menggunakan struktur bentang panjang dengan jumlah kolom interior yang terbatas. Sistem Pre-Engineered Building (PEB) sesuai diterapkan karena mampu menghasilkan ruang bebas kolom dengan struktur baja yang relatif ringan (Sah et al., 2023).

Pada sistem PEB, beban atap diterima oleh roof purlin, kemudian diteruskan ke rafter, kolom, hingga fondasi. Oleh karena itu, perubahan beban atap dapat memengaruhi respons elemen sekunder maupun struktur utama. Analisis menggunakan STAAD.Pro dapat mengevaluasi gaya aksial, momen lentur, gaya geser, defleksi, dan utilisasi elemen (Kavitha et al., 2023). Sementara itu, Rao et al. (2024) menunjukkan bahwa gaya desain dan defleksi merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja struktur pre-engineered industrial warehouse.

Sistem Solar Photovoltaic (PV)

Solar photovoltaic (PV) merupakan teknologi yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Pada aplikasi rooftop PV, sistem umumnya terdiri atas modul PV, mounting/rail, clamp, inverter, kabel, dan komponen kelistrikan lainnya. Seluruh komponen yang terpasang pada atap perlu diperhitungkan sebagai beban tambahan pada struktur eksisting. Penambahan sistem PV dapat meningkatkan beban gravitasi sekaligus memengaruhi respons struktur terhadap beban angin (Sari & Pratiwi, 2024; Mendes et al., 2022).

Besarnya beban PV bergantung pada berat modul, sistem *mounting*, serta konfigurasi pemasangannya. Oleh karena itu, beban aktual sebaiknya ditentukan berdasarkan berat seluruh komponen yang terpasang dibagi luas area panel, bukan hanya berdasarkan berat modul. Studi Sari dan Pratiwi (2024) menunjukkan bahwa penambahan beban panel surya pada struktur *warehouse* dapat meningkatkan gaya internal elemen struktur, sehingga diperlukan evaluasi terhadap kapasitas dan kinerja struktur eksisting.

Pengaruh Penambahan Solar Panel terhadap Struktur

Penambahan solar panel meningkatkan beban mati permanen pada atap, sehingga memengaruhi kinerja struktur, yaitu:

a. Beban gravitasi: DLbaru = DLexisting + DLPV
b. Momen lentur: meningkat seiring bertambahnya beban (M=wL2/8).
c. Gaya geser: meningkat akibat tambahan beban atap (V=wL/2).
d. Defleksi: bertambah dan perlu diperiksa terhadap batas layan.
e. Gaya aksial kolom: meningkat akibat bertambahnya reaksi vertikal.

Dengan demikian, penambahan solar panel perlu dievaluasi terhadap kekuatan, defleksi, dan kapasitas struktur PEB.

Beban pada Bangunan Baja

Menurut standar pembebanan, struktur baja harus mempertimbangkan beberapa jenis beban, yaitu:

a. **Beban mati:** meliputi berat struktur, atap, gording, cladding, solar panel, dan mounting system.
b. **Beban hidup:** berasal dari aktivitas pekerja dan perawatan atap.
c. **Beban angin:** dapat menjadi beban dominan pada PEB bentang besar dan dipengaruhi oleh keberadaan solar panel.
d. **Beban gempa:** penambahan solar panel meningkatkan massa bangunan sehingga gaya gempa juga meningkat (V=CsW).

Dengan demikian, penambahan solar panel perlu diperhitungkan dalam seluruh kombinasi pembebanan struktur.

Kinerja Struktur Baja

Kinerja struktur menunjukkan kemampuan bangunan dalam menahan seluruh kombinasi pembebanan tanpa mengalami kegagalan. Parameter yang ditinjau meliputi kapasitas lentur, aksial, geser, defleksi, drift, dan utilization ratio.

Pada penelitian ini, indikator utama adalah Utilization Ratio (UR): UR = Demand/Capacity

Interpretasi:

a. UR < 0,80: sangat aman
b. 0,80–1,00: aman, mendekati kapasitas
c. UR = 1,00: batas kapasitas
d. UR > 1,00: tidak aman

Semakin besar nilai UR, semakin tinggi tingkat pemanfaatan kapasitas struktur.

Analisis Struktur Menggunakan STAAD.Pro

STAAD.Pro merupakan perangkat lunak analisis struktur berbasis Finite Element Method (FEM) yang digunakan untuk menganalisis struktur baja. Program ini dapat menghitung gaya aksial, momen, geser, torsi, displacement, reaksi tumpuan, dan rasio desain. Penggunaan perangkat lunak seperti STAAD.Pro memungkinkan gaya internal dan perpindahan struktur dihitung berdasarkan kombinasi pembebanan yang ditentukan. Penelitian Kavitha et al. (2023) menggunakan STAAD.Pro untuk menganalisis sistem warehouse dan mengevaluasi gaya aksial, momen, serta faktor utilisasi elemen. Penelitian dilakukan dengan

membandingkan dua kondisi:1) Struktur eksisting tanpa solar panel, 2) Struktur setelah penambahan solar panel. Hasil perbandingan digunakan untuk mengetahui perubahan gaya dalam, displacement, dan rasio kapasitas struktur.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan analisis numerik untuk mengevaluasi pengaruh penambahan solar panel terhadap kinerja struktur Pre-Engineered Building (PEB) pada bangunan warehouse. Pemodelan dan analisis struktur dilakukan menggunakan STAAD.Pro, dengan membandingkan model struktur eksisting dan model setelah penambahan solar panel. Pendekatan analisis struktur PEB menggunakan STAAD.Pro juga diterapkan oleh Kavitha et al. (2023) dan Tomar dan Grover (2024).

Model dibuat berdasarkan geometri, dimensi penampang, material, dan kondisi tumpuan struktur eksisting. Beban yang diperhitungkan meliputi beban mati, beban hidup atap, angin, gempa, serta beban tambahan solar panel sebesar **0,15 kN/m²**. Pembebanan mengacu pada SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, sedangkan pemeriksaan kapasitas elemen baja mengacu pada SNI 1729:2020.

Kedua model dianalisis menggunakan kondisi struktur dan kombinasi pembebanan yang sama. Parameter yang dibandingkan meliputi gaya aksial, momen lentur, gaya geser, defleksi, dan utilization ratio. Perubahan respons struktur dihitung dengan persamaan:

$$\%\Delta X = (XPV - Xexisting)/Xexisting \times 100\%,$$

Dengan X merupakan parameter respons struktur yang dianalisis. Evaluasi kinerja dilakukan dengan membandingkan demand terhadap kapasitas elemen struktur melalui utilization ratio. Elemen dengan rasio tertinggi ditentukan sebagai elemen kritis. Hasil perbandingan kedua model digunakan untuk mengetahui tingkat pengaruh penambahan solar panel terhadap kinerja dan kapasitas struktur PEB.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Struktur

Analisis dilakukan dengan membandingkan struktur warehouse kondisi eksisting dan kondisi setelah penambahan solar panel sebesar 0,15 kN/m², dengan geometri, material, tumpuan, dan parameter pembebanan lainnya tetap sama. Kinerja struktur dievaluasi berdasarkan utilization ratio (UR). Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh elemen masih memiliki UR < 1,00, sehingga memenuhi kapasitas desain. Namun, penambahan solar panel menyebabkan peningkatan utilization ratio pada seluruh elemen yang ditinjau yaitu : Main

Column, Rafter Haunch, Roof Purlin, Rafter Mid Span, dan End Wall Column pada tabel dibawah.

Tabel 1. Perbandingan Utilization Ratio Struktur Sebelum dan Sesudah Penambahan Solar Panel.

No	Elemen Struktur	Existing	Dengan Solar Panel	Perubahan Rasio	Peningkatan (%)
1	Main Column	0,79	0,89	0,1	12,66
2	Rafter Haunch	0,78	0,87	0,09	11,54
3	Roof Purlin	0,74	0,91	0,17	22,97
4	Rafter Mid Span	0,73	0,85	0,12	16,44
5	End Wall Column	0,71	0,81	0,1	14,08

Persentase perubahan utilization ratio dihitung menggunakan persamaan: $\%\Delta UR = (URPV - URexisting)/URexisting \times 100\%$. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa roof purlin mengalami peningkatan utilization ratio terbesar, yaitu dari 0,74 menjadi 0,91 atau meningkat sebesar 22,97%. Sementara itu, peningkatan terkecil terjadi pada rafter haunch, yaitu sebesar 11,54%.

Pengaruh Solar Panel terhadap Roof Purlin

Roof purlin merupakan elemen yang paling terpengaruh oleh penambahan *solar panel*. Utilization ratio meningkat dari 0,74 menjadi 0,91. Peningkatan sebesar : $\Delta UR = URPV - URexisting$, $\Delta UR = 0,91 - 0,74 \Rightarrow \Delta UR = 0,17$ $\%\Delta UR = \Delta UR/URexisting \times 100\% \Rightarrow \%\Delta UR = 0,740,17 \times 100\% \Rightarrow \%\Delta UR = 22,97\%$. Peningkatan 22,97% terjadi karena roof purlin menerima beban solar panel secara langsung sebelum diteruskan ke rafter dan kolom. Nilai UR = 0,91 < 1,00 menunjukkan elemen masih memenuhi kapasitas, tetapi sudah mendekati batas desain sehingga menjadi elemen yang paling kritis.

Pengaruh Solar Panel terhadap Main Column

Main column memiliki utilization ratio sebesar 0,79 pada kondisi eksisting dan meningkat menjadi 0,89 setelah penambahan solar panel. Selisih utilization ratio: $\Delta UR = URPV - URexisting$, $\Delta UR = 0,89 - 0,79 \Rightarrow \Delta UR = 0,10$ $\%\Delta UR = (0,89 - 0,79/0,79) \times 100\% = 0,10/0,79 \times 100\% \Rightarrow \%\Delta UR = 12,66\%$. Dengan demikian, terjadi peningkatan 12,66%, namun nilai UR 0,89 < 1,00, sehingga Main Column masih memenuhi kapasitas desain.

Pengaruh Solar Panel terhadap Rafter Haunch

Penambahan solar panel meningkatkan utilization ratio Rafter Haunch dari 0,78 menjadi 0,87. Selisih utilization ratio: $\Delta UR = URPV - URexisting$, $\Delta UR = 0,87 - 0,78 \Rightarrow \Delta UR = 0,09$. Selanjutnya, persentase perubahan dihitung dengan: $\%\Delta UR = 0,87 - 0,78/0,78$

×100% = 0,09/0,78 ×100% => %ΔUR = 11,54%. Terjadi peningkatan 11,54%, namun UR = 0,87 < 1,00, sehingga Rafter Haunch masih memenuhi kapasitas desain.

Pengaruh Solar Panel terhadap Rafter Mid Span

Penambahan *solar panel* meningkatkan utilization ratio Rafter Mid Span dari 0,73 menjadi 0,85. Selisih utilization ratio: ΔUR = URPV −URexisting, ΔUR = 0,85−0,73 => ΔUR=**0,12**. Selanjutnya, persentase perubahan utilization ratio dihitung dengan: %ΔUR = (0,85−0,73/0,73)×100% = 0,12/0,73×100% =>%ΔUR=**16,44%.** Terjadi peningkatan 16,44%, namun UR = 0,85 < 1,00, sehingga Rafter Mid Span masih memenuhi kapasitas desain.

Pengaruh Solar Panel terhadap End Wall Column

Penambahan solar panel meningkatkan utilization ratio End Wall Column dari 0,71 menjadi 0,81. Selisih utilization ratio: ΔUR=URPV −URexisting, ΔUR = 0,81−0,71 => ΔUR=**0,10** Persentase perubahan utilization ratio dihitung dengan: %ΔUR = 0,81−0,71/0,71 ×100% =0,10/0,71×100% %ΔUR=**14,08%.** Dengan demikian, terjadi peningkatan 14,08%, namun nilai UR 0,81 < 1,00, sehingga End Wall Column masih memenuhi kapasitas desain.

Perbandingan Tingkat Kritis Elemen Struktur

Elemen yang ditinjau meliputi Main Column, Rafter Haunch, Roof Purlin, Rafter Mid Span, dan End Wall Column. Main Column merupakan elemen utama yang meneruskan beban dari portal ke fondasi, sedangkan Rafter Haunch dan Rafter Mid Span merupakan bagian dari rangka portal yang menerima kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Roof Purlin merupakan elemen sekunder yang menerima beban atap dan tambahan beban solar panel secara langsung, sementara End Wall Column berfungsi menopang struktur pada bidang ujung bangunan. Perbandingan nilai UR digunakan untuk mengidentifikasi elemen yang paling kritis sebelum dan sesudah penambahan solar panel. Hasil analisis menunjukkan perubahan elemen paling kritis setelah pemasangan solar panel. Seperti pada tabel 2, pada kondisi eksisting, Main Column memiliki UR tertinggi sebesar 0,79, sedangkan setelah pemasangan solar panel, Roof Purlin menjadi elemen paling kritis dengan UR 0,91.

Tabel 2. Peringkat Elemen Berdasarkan Utilization Ratio.

No	Existing	Ratio	Dengan Solar Panel	Ratio
1	Main Column	0,79	Roof Purlin	0,91
2	Rafter Haunch	0,78	Main Column	0,89
3	Roof Purlin	0,74	Rafter Haunch	0,87
4	Rafter Mid Span	0,73	Rafter Mid Span	0,85
5	End Wall Column	0,71	End Wall Column	0,81

Perubahan ini menunjukkan bahwa *solar panel* memberikan pengaruh lebih besar terhadap elemen sekunder atap, khususnya *roof purlin*, dibandingkan beberapa elemen utama portal.

Evaluasi Kinerja Struktur Setelah Penambahan Solar Panel

Hasil analisis menunjukkan seluruh elemen struktur memiliki utilization ratio (UR) < 1,00 setelah penambahan solar panel. Nilai tertinggi terdapat pada roof purlin sebesar 0,91. Karena UR = 0,91 < 1,00, struktur masih memenuhi kapasitas desain dan dinyatakan aman berdasarkan parameter utilization ratio.

Pembahasan Pengaruh Penambahan Beban Solar Panel

Total berat sistem solar panel sebesar 79.632,66 kg pada area 5.298,774 m², sehingga menghasilkan beban tambahan rata-rata sebesar 0,15 kN/m². Beban ini termasuk beban mati permanen yang meningkatkan beban gravitasi dan gaya dalam struktur.

Beban mati setelah pemasangan dihitung:

$$DL_{total} = DL_{existing} + 0{,}15 \text{ kN/m2}$$

Berdasarkan hasil analisis, peningkatan utilization ratio terbesar terjadi pada roof purlin sebesar 22,97%. Hal ini menunjukkan bahwa roof purlin perlu mendapat perhatian karena menerima beban solar panel secara langsung, selain pemeriksaan pada elemen utama (main frame).

Analisis Tingkat Perubahan Utilization Ratio

Elemen yang ditinjau meliputi Roof Purlin, Rafter Mid Span, End Wall Column, Main Column, dan Rafter Haunch. Perbandingan dilakukan berdasarkan persentase peningkatan utilization ratio untuk mengidentifikasi tingkat sensitivitas masing-masing elemen terhadap penambahan beban solar panel. Pada tabel 3, seluruh elemen dibandingkan berdasarkan persentase perubahan, roof purlin memiliki peningkatan terbesar sebesar 22,97%, diikuti oleh rafter mid span sebesar 16,44%, end wall column sebesar 14,08%, main column sebesar 12,66%, dan rafter haunch sebesar 11,54%. Urutan tersebut menunjukkan bahwa sensitivitas elemen terhadap tambahan beban solar panel tidak sama.

Tabel 3. Tingkat Perubahan Utilization Ratio.

No	Elemen	Peningkatan UR (%)	Tingkat Pengaruh
1	Roof Purlin	22,97	Tertinggi
2	Rafter Mid Span	16,44	Tinggi
3	End Wall Column	14,08	Sedang
4	Main Column	12,66	Sedang
5	Rafter Haunch	11,54	Terendah

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa roof purlin merupakan elemen yang paling sensitif terhadap penambahan solar panel. Kondisi ini berkaitan dengan posisi roof purlin yang menerima beban tambahan secara langsung dari sistem atap dan solar panel. Sementara itu, pengaruh terhadap main column dan rafter haunch relatif lebih rendah secara persentase karena beban solar panel telah terdistribusi melalui sistem atap sebelum mencapai struktur utama.

Implikasi terhadap Perencanaan Pemasangan Solar Panel pada PEB

Pemasangan solar panel pada warehouse PEB perlu diawali dengan verifikasi kapasitas struktur eksisting, terutama pada elemen yang menerima beban langsung. Hasil penelitian menunjukkan roof purlin menjadi elemen yang perlu mendapat perhatian karena mengalami peningkatan utilization ratio paling besar. Sebelum instalasi, perlu dilakukan pemeriksaan purlin, sambungan, rafter, kolom, defleksi atap, beban angin, pengaruh gempa, dan kapasitas fondasi. Dengan demikian, pemasangan solar panel dapat dilakukan tanpa mengurangi keamanan dan kinerja struktur PEB.

Temuan Utama Penelitian

a. Penambahan solar panel sebesar 0,15 kN/m² meningkatkan utilization ratio seluruh elemen yang ditinjau.
b. Roof Purlin menjadi elemen paling kritis, dengan UR meningkat dari 0,74 menjadi 0,91 (22,97%).
c. Peningkatan UR pada Main Column, Rafter Haunch, Rafter Mid Span, dan End Wall Column masing-masing sebesar 12,66%, 11,54%, 16,44%, dan 14,08%.
d. Nilai UR maksimum sebesar 0,91 < 1,00, sehingga struktur masih memenuhi kapasitas desain berdasarkan model analisis.
e. Penambahan solar panel mengubah elemen paling kritis dari Main Column menjadi Roof Purlin.
f. Hasil ini menunjukkan bahwa evaluasi pemasangan solar panel pada PEB perlu memperhatikan elemen utama maupun elemen sekunder, terutama roof purlin yang menerima beban PV secara langsung.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, penambahan solar panel sebesar 0,15 kN/m² pada warehouse PEB meningkatkan utilization ratio seluruh elemen yang ditinjau. Roof Purlin menjadi elemen paling kritis, dengan peningkatan UR dari 0,74 menjadi 0,91 (22,97%), diikuti Main Column 12,66%, Rafter Haunch 11,54%, Rafter Mid Span 16,44%, dan End Wall Column 14,08%. Nilai utilization ratio maksimum sebesar 0,91 < 1,00, sehingga struktur masih memenuhi kapasitas desain berdasarkan parameter analisis yang digunakan.

Namun, karena Roof Purlin mendekati batas kapasitas, perlu dilakukan verifikasi kondisi aktual struktur, sambungan, defleksi, serta pengaruh beban angin sebelum pemasangan solar panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi solar panel pada warehouse PEB layak secara struktural berdasarkan model yang dianalisis, sekaligus mendukung pemanfaatan energi terbarukan melalui penggunaan area atap yang tersedia.

DAFTAR REFERENSI

Alrawashdeh, H., & Stathopoulos, T. (2023). Wind loading of rooftop PV panels cover plate: A codification-oriented study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 240*, 105489. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105489

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2020a). *SNI 1727:2020: Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2020b). *SNI 1729:2020: Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural (ANSI/AISC 360-16, IDT)*. Badan Standardisasi Nasional.

Bentley Systems, Inc. (2024). *STAAD.Pro: Structural analysis and design software*. Bentley Systems.

Choi, H., Shedo, D. A., & Chang, B. (2024). Serviceability analysis and feasibility study of ballasted rooftop PV system on existing concrete roof slab buildings. *Renewable Energy, 228*, 120622. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120622

Dai, S. F., Liu, H. J., Yang, J. H., & Peng, H. Y. (2022). Wind loads on roof-mounted isolated solar panels of tall buildings through wind tunnel testing. *Solar Energy, 231*, 607–622. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.005

Dai, S. F., Liu, H. J., Lam, H. F., & Peng, H. Y. (2025). Interference effect of photovoltaic solar arrays on wind load of building roof by large eddy simulations. *Engineering Structures, 336*, 120453. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120453

Estephan, J., Gan Chowdhury, A., & Irwin, P. (2022). A new experimental-numerical approach to estimate peak wind loads on roof-mounted photovoltaic systems by incorporating inflow turbulence and dynamic effects. *Engineering Structures, 252*, 113739. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113739

Galevien, A. P., Ridwan, M. K., & Wardana, A. N. I. (2025). Assessing the viability of rooftop solar PV in energy-intensive industries: A techno-economic and safety framework for the Indonesian FMCG sector. *Energies, 18*(21), 5859. https://doi.org/10.3390/en18215859

Kavitha, R., Logeshwaran, S., Sabarinathan, S., & Vijai Anand, V. (2023). Structural analysis and design for a warehouse using STAAD PRO. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.479

Mendes, S., Ellowitz, J., & Xu, H. (2022). Evaluation of existing buildings for feasibility of photovoltaic array installation. In *Forensic Engineering 2022*. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784484548.008

Mostofi, F., Tokdemir, O. B., & Togan, V. (2020). Structural performance of an existing building roof subjected to additional PV panel load. In *2020 2nd International Conference on Photovoltaic Science and Technologies (PVCon)* (pp. 1–6). https://doi.org/10.1109/PVCon51547.2020.9757801

Nerlekar, H. H., & Radhika, K. L. (2024). Analytical study of pre-engineered building subjected to lateral loads. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology, 45*(3). https://doi.org/10.52783/tjjpt.v45.i03.7635

Pardhi, S., Bandewar, D., & Jat, S. (2022). Analysis of warehouse structure in pre-engineered building with conventional steel building. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 10*(9), 1093–1102. https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46750

Peng, H. Y., Dai, S. F., & Liu, H. J. (2023). Wind loading characteristics and roof zoning of solar arrays mounted on flat-roofed tall buildings. *Journal of Building Engineering, 66*, 105823. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105823

Rao, J. V., Ramana, K. V., & Rao, B. N. (2024). Analysis and design of pre-engineered industrial warehouse using IS: 800 and AISC. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 19*(3), 154–159. https://doi.org/10.59018/022427

Sah, S. K., Kangda, M. Z., Sathe, S., & Mate, N. (2023). A state of art review on analysis and design of pre-engineered buildings. *Materials Today: Proceedings, 77*, 704–710. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.361

Sari, D. Y., & Pratiwi, A. R. (2024). Analisis kelayakan struktur eksisting pada bangunan *warehouse* untuk pemasangan panel surya. *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan, 6*(1), 244–253. https://doi.org/10.52005/teslink.v6i1.405

Tomar, S., & Grover, R. (2024). Analysis and design of pre-engineered industrial warehouse building with different base condition. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 12*(12), 1132–1138. https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.66009

Yao, J. F., Tu, Z. B., Shen, G. H., Guo, Y., & Wang, D. (2024). Experimental investigation of wind pressures on photovoltaic (PV) panel installed parallel to residential gable roof. *Solar Energy, 271*, 112452. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112452