

# Pemanfaatan Wawasan Persemenan Untuk Mendukung Struktur Bangunan Berbasis Energi Terbarukan: Studi Kasus Gedung Industri

Anni Rahmat, Yuni Kurniati\*, Hadi Cahyono, Irvan Adhin Cholilie, Diva Alifia Insiyroh

Received: 21 April 2026  
Accepted: 19 August 2026  
Published: 30 September 2026

**Keywords:**  
*Energi terbarukan,  
Photovoltaic,  
Struktur bangunan,  
FEM,  
Persemenan*

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan industri dalam mendukung integrasi sistem energi terbarukan melalui pemasangan photovoltaic (PV) module pada atap gedung. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode engineering case study berbasis simulasi numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) pada perangkat lunak ANSYS. Analisis dilakukan terhadap kombinasi beban meliputi beban mati, hidup, tambahan PV, termal, dan gempa sesuai standar SNI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan beban PV sebesar  $\pm 14,25\%$  masih dapat ditahan oleh struktur dari sisi beban gravitasi dengan lendutan dalam batas izin dan nilai Demand to Capacity Ratio (DCR)  $< 1$ . Namun, pada kondisi beban gempa terjadi peningkatan DCR hingga  $> 2$  yang mengindikasikan kegagalan struktur. Dari perspektif persemenan, peningkatan beban berpotensi menimbulkan retak mikro pada elemen beton serta degradasi kinerja jangka panjang. Penelitian ini menekankan pentingnya integrasi evaluasi struktur dan material dalam perencanaan bangunan berbasis energi terbarukan serta memberikan rekomendasi teknis berupa perkuatan struktur dan optimasi material berbasis semen.

## PENDAHULUAN

Transformasi menuju pembangunan berkelanjutan menjadi isu global yang semakin mendesak, terutama dalam sektor konstruksi yang berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dunia [1], [2]. Integrasi sistem energi terbarukan, khususnya photovoltaic (PV), pada bangunan industri merupakan salah satu strategi yang efektif dalam menekan konsumsi energi berbasis fosil dan mendukung transisi menuju bangunan rendah karbon [3], [4]. Namun demikian, implementasi teknologi ini tidak terlepas dari tantangan teknis, terutama terkait dengan kemampuan struktur eksisting dalam menahan beban tambahan.

Bangunan industri umumnya dirancang dengan mempertimbangkan beban operasional tertentu, seperti beban mesin dan crane, namun belum tentu dirancang untuk mengakomodasi beban tambahan dari sistem energi terbarukan. Penambahan PV module pada atap dapat meningkatkan beban gravitasi sekaligus memperbesar gaya seismik yang bekerja pada struktur [5], [6]. Hal ini menjadi krusial terutama di wilayah dengan potensi gempa tinggi seperti Indonesia, yang memiliki tingkat aktivitas seismik relatif tinggi dan memerlukan pertimbangan beban gempa dalam evaluasi maupun desain struktur bangunan [7].

Di sisi lain, material berbasis semen seperti beton memiliki peran penting dalam sistem struktur bangunan, khususnya pada pondasi dan elemen pendukung. Wawasan persemenan tidak hanya berfokus pada komposisi material, tetapi juga pada perilaku material terhadap interaksi beban mekanik, termal, dan lingkungan [8]. Selain aspek kinerja struktural, material berbasis semen juga menjadi perhatian dalam konteks pembangunan berkelanjutan karena produksi semen dan beton memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon global.

Namun, kajian yang mengintegrasikan aspek struktur dan persemenan dalam konteks energi terbarukan masih terbatas. Pendekatan finite element method (FEM) dapat menjadi salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap perubahan kondisi pembebanan dan mengidentifikasi distribusi tegangan maupun deformasi pada elemen struktur [6], [9].

Penelitian terdahulu umumnya hanya berfokus pada analisis struktur akibat penambahan beban PV tanpa mempertimbangkan implikasi terhadap material berbasis semen. Oleh karena itu, research gap dalam penelitian ini adalah kurangnya pendekatan holistik yang menggabungkan analisis struktur berbasis FEM dengan evaluasi material persemenan.

Penelitian ini terletak pada integrasi analisis struktur dan wawasan persemenan dalam mengevaluasi kelayakan bangunan industri terhadap penerapan energi terbarukan, sehingga memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dalam desain dan retrofit bangunan berkelanjutan.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode engineering case study yang mengkombinasikan data lapangan dan simulasi numerik. Studi kasus dilakukan pada PT XXX, yaitu perusahaan yang memiliki fasilitas bangunan industri dengan struktur utama baja dan sistem crane sebagai bagian dari fasilitas operasionalnya.

### **A. Pemodelan Struktur**

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS dengan membangun model tiga dimensi berdasarkan data aktual bangunan. Elemen struktur seperti kolom, balok, dan atap dimodelkan secara detail untuk menangkap distribusi beban secara realistis. Properti material baja dan beton dimasukkan berdasarkan standar teknis, termasuk parameter elastisitas, kekuatan luluh, dan karakteristik termal. Model 3D bangunan dibuat menggunakan ANSYS berdasarkan dimensi dan konfigurasi struktur aktual yang diperoleh dari data bangunan.

Dalam pemodelan numerik digunakan beberapa asumsi. Geometri dan konfigurasi struktur diasumsikan sesuai dengan kondisi aktual berdasarkan data lapangan dan data teknis yang tersedia. Material baja diasumsikan homogen dan isotropik dengan sifat mekanik yang seragam pada setiap elemen. Kondisi sambungan dan tumpuan dimodelkan berdasarkan konfigurasi struktur aktual yang tersedia dalam data penelitian. Kerusakan lokal, korosi, ketidaksempurnaan geometrik, dan variasi kualitas material di lapangan tidak dimodelkan secara eksplisit karena tidak tersedia data kuantitatif yang memadai.

Struktur dianalisis pada dua kondisi utama, yaitu kondisi eksisting dan kondisi setelah penambahan PV module. PV module dimodelkan sebagai tambahan beban mati pada sistem atap dengan berat sebesar 11 kg/m<sup>2</sup>. Pengaruh penambahan beban tersebut kemudian dievaluasi terhadap respons struktur berupa tegangan, displacement, Demand to Capacity Ratio (DCR), dan faktor keamanan.

### **B. Properti Material**

Material baja dan beton dimodelkan berdasarkan data literatur dan standar teknis, termasuk parameter mekanik dan termal. Material baja dan beton dimodelkan berdasarkan data teknis dan literatur yang relevan. Struktur utama bangunan dimodelkan menggunakan baja SS400 dengan tegangan luluh sebesar 245 MPa. Parameter mekanik utama yang digunakan dalam pemodelan meliputi massa jenis, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan tegangan luluh.

Untuk elemen beton yang berkaitan dengan pondasi dan elemen pendukung, parameter material ditentukan berdasarkan data material yang tersedia. Parameter mekanik beton meliputi massa jenis, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan kuat tekan beton. Apabila data pengujian material aktual tidak tersedia, nilai material ditentukan berdasarkan literatur dan standar teknis yang relevan.

Acuan desain struktur baja menggunakan SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, sedangkan elemen beton mengacu pada SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. SNI 1729:2020 merupakan adopsi identik AISC 360-16 untuk bangunan gedung baja struktural.

Parameter termal berupa koefisien muai termal, konduktivitas termal, dan kapasitas panas spesifik digunakan apabila analisis mempertimbangkan pengaruh temperatur terhadap respons struktur. Dalam penelitian ini, beban termal digunakan sebagai salah satu kondisi pembebanan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap perubahan temperatur.

### C. Pembebanan

Pembebanan dalam simulasi mencakup beban mati, beban hidup, beban tambahan dari PV module, beban termal akibat fluktuasi suhu, serta beban gempa yang mengacu pada SNI 1726:2019. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh distribusi tegangan, deformasi, serta rasio kapasitas struktur (DCR).

Simulasi dalam penelitian ini mencakup beberapa hal, yakni sebagai berikut:

#### 1. Beban (Dead Load)

Beban mati merupakan beban yang berasal dari berat sendiri elemen struktur dan komponen permanen bangunan yang memiliki posisi tetap selama masa pelayanan struktur. Beban ini meliputi berat kolom, balok, rangka atap, elemen crane, penutup atap, serta komponen permanen lainnya.

#### 2. Beban hidup (Live Load)

Beban hidup merupakan beban yang berasal dari penggunaan atau aktivitas pada bangunan yang bersifat tidak permanen. Dalam penelitian ini, beban hidup atap ditentukan berdasarkan fungsi dan kondisi penggunaan atap sesuai dengan SNI 1727:2020.

#### 3. Beban tambahan PV

Beban PV merupakan beban mati tambahan yang berasal dari photovoltaic module dan sistem pendukungnya. Luas PV module sebesar 3520,97 m<sup>2</sup> dengan berat sistem sebesar 11 kg/m<sup>2</sup> menghasilkan tambahan massa sekitar 38.164 kg. Beban tersebut didistribusikan pada area atap yang direncanakan untuk pemasangan PV.

SNI 1727:2020 Pasal 4.17 mengatur bahwa struktur atap yang mendukung sistem panel surya harus diperiksa terhadap kombinasi beban yang relevan. Pada kondisi tertentu, beban hidup atap dapat tidak diterapkan pada area yang tertutup panel surya apabila jarak bebas antara panel dan permukaan atap tidak lebih dari 610 mm.

#### 4. Beban termal

Beban termal merupakan respons struktural yang timbul akibat perubahan temperatur yang menyebabkan pemuaian atau penyusutan material. Dalam pemodelan, pengaruh temperatur direpresentasikan melalui perubahan temperatur pada elemen struktur dan parameter termal material. Parameter utama yang berkaitan dengan respons termal adalah koefisien muai termal, modulus elastisitas, dan temperatur referensi.

#### 5. Beban gempa

Beban gempa merupakan beban lateral akibat respons struktur terhadap gerakan tanah selama kejadian gempa. esarnya gaya geser dasar dapat dinyatakan sebagai:

$$V = C_s \times W \quad (1)$$

Dengan V adalah gaya geser dasar seismik,  $C_s$  adalah koefisien respons seismik, dan W adalah berat seismik efektif struktur. Penambahan PV meningkatkan berat seismik efektif sehingga dapat meningkatkan gaya gempa yang harus dipikul oleh struktur. Perhitungan parameter gempa mengacu pada SNI 1726:2019.

### D. Analisis FEM

Finite Element Method (FEM) digunakan untuk membagi struktur menjadi sejumlah elemen hingga yang saling terhubung pada titik nodal. Beban dan kondisi batas diberikan pada model, kemudian perangkat lunak ANSYS menyelesaikan persamaan keseimbangan numerik untuk memperoleh respons struktur pada setiap elemen. Analisis digunakan untuk membandingkan kondisi struktur sebelum dan sesudah pemasangan PV module.

Analisis dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh beberapa hal berikut:

#### 1. Tegangan (stress)

Tegangan menunjukkan intensitas gaya internal yang bekerja pada elemen struktur akibat pembebanan. Dalam analisis baja, tegangan ekuivalen dibandingkan dengan kapasitas material untuk mengetahui potensi terjadinya overstress.

#### 2. Deformasi (displacement)

Displacement menunjukkan perpindahan titik atau elemen struktur akibat pembebanan. Nilai displacement maksimum dibandingkan dengan batas lendutan yang diizinkan berdasarkan kriteria desain yang digunakan.

3. Demand to Capacity Ratio (DCR)

DCR merupakan perbandingan antara tuntutan pembebanan terhadap kapasitas elemen struktur. Secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{DCR} = \text{Demand} / \text{Capacity}$$

Nilai  $\text{DCR} \leq 1$  menunjukkan bahwa tuntutan pembebanan masih berada dalam kapasitas yang tersedia, sedangkan  $\text{DCR} > 1$  menunjukkan bahwa tuntutan telah melampaui kapasitas elemen dan memerlukan evaluasi atau perkuatan.

4. Faktor keamanan

Faktor keamanan menunjukkan rasio antara kapasitas atau batas kekuatan material terhadap tegangan yang terjadi akibat pembebanan. Nilai faktor keamanan digunakan sebagai indikator tambahan dalam mengevaluasi keamanan elemen struktur.

## E. Evaluasi

Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan standar desain untuk mengevaluasi kelayakan struktur. Selain itu, dilakukan analisis tambahan dari perspektif persemenan untuk memahami dampak beban terhadap elemen beton, khususnya dalam konteks durabilitas dan kinerja jangka panjang. Hasil dibandingkan dengan standar SNI dan ASCE untuk menentukan kelayakan struktur.

Hasil simulasi dibandingkan dengan kriteria desain dan standar yang digunakan dalam penelitian. SNI 1727:2020 digunakan untuk evaluasi beban minimum dan beban panel surya, sedangkan SNI 1726:2019 digunakan untuk evaluasi ketahanan terhadap beban gempa. Untuk struktur baja digunakan SNI 1729:2020, sedangkan evaluasi elemen beton mengacu pada SNI 2847:2019.

ASCE/SEI 7-16 digunakan sebagai referensi pembanding untuk kriteria pembebanan dan kombinasi beban, sedangkan International Existing Building Code (IEBC) 2018 digunakan sebagai referensi tambahan dalam mengevaluasi perubahan kondisi struktur eksisting akibat penambahan beban. IEBC 2018 Section 502.4 mensyaratkan evaluasi terhadap elemen pemikul beban gravitasi apabila penambahan menyebabkan kenaikan beban mati, beban hidup, atau beban salju lebih dari 5%.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan, displacement, DCR, dan faktor keamanan antara kondisi eksisting dan kondisi setelah pemasangan PV. Analisis tambahan terhadap aspek persemenan dilakukan secara kualitatif berdasarkan implikasi penambahan beban terhadap elemen beton, khususnya pondasi dan elemen pendukung. Karena data tanah dan kapasitas pondasi aktual tidak tersedia, evaluasi pondasi tidak digunakan sebagai hasil kuantitatif utama penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi struktur eksisting Gedung PT XXX terkait dengan rencana penambahan PV Module pada atap gedung. Evaluasi ini penting mengingat penambahan beban akibat panel surya memiliki dampak terhadap integritas struktur, khususnya dalam konteks beban gravitasi dan beban gempa. Berdasarkan data yang dikumpulkan, luas PV Module yang akan dipasang adalah sebesar 3520,97 m<sup>2</sup> dengan total kapasitas 749,6 kWp. Berat tambahan akibat PV Module sebesar 11 kg/m<sup>2</sup> menghasilkan total penambahan beban sebesar 38164 kg, atau sekitar 14,25% dari total berat struktur (267700 kg).

Tabel 1. Hasil Simulasi Struktur

| Parameter           | Kondisi Eksisting         | Dengan PV Module                  | Perubahan | Evaluasi        |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------|
| Berat struktur      | 267.700 kg                | 305.864 kg                        | +14,25%   | Perlu evaluasi  |
| DCR beban gravitasi | 0,812                     | 0,709                             | -12,69%   | DCR < 1         |
| Lendutan maksimum   | 42,08 mm                  | 66,59 mm                          | +58,24%   | Masih < L/240   |
| Batas lendutan      | 95,83 mm                  | 95,83 mm                          | —         | Memenuhi        |
| DCR beban gempa     | 1,562                     | 2,204                             | +41,10%   | DCR > 1         |
| Status struktur     | Memerlukan evaluasi gempa | Tidak memenuhi pada kondisi gempa | —         | Perlu perkuatan |

Sesuai dengan ketentuan IEBC 2018 Clause 502.4, jika penambahan beban lebih dari 5%, maka evaluasi struktur wajib dilakukan menggunakan standar terbaru (SNI 1727:2020). Evaluasi dilakukan terhadap dua kondisi utama: beban gravitasi dan beban gempa. Simulasi pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak berbasis elemen hingga, dengan mengasumsikan struktur baja SS400 ( $F_y = 245$  MPa). Konfigurasi crane pada Hall 1 dan Hall 2 turut dimasukkan ke dalam model karena dapat menghasilkan beban dinamis yang signifikan. Dalam penelitian ini, penambahan berat sebesar 14,25% menjadi dasar dilakukannya evaluasi lebih lanjut terhadap struktur eksisting. Ketentuan tersebut digunakan sebagai referensi tambahan karena IEBC merupakan kode untuk evaluasi bangunan eksisting, sedangkan kriteria teknis pembebanan dalam penelitian ini tetap mengacu pada standar nasional Indonesia yang relevan.

Evaluasi terhadap beban gravitasi menunjukkan bahwa penambahan PV module justru menurunkan Demand to Capacity Ratio (DCR) dari 0,812 menjadi 0,709. Hal ini disebabkan oleh pengecualian Roof Live Load pada area tertutup panel surya dengan jarak bebas  $\leq 610$  mm, sebagaimana dijelaskan dalam SNI 1727:2020 pasal 4.17. Lendutan maksimum akibat beban kombinasi (DL + Lr) meningkat dari 42,08 mm menjadi 66,59 mm setelah penambahan PV Module. Namun, nilai ini masih berada dalam batas izin IBC Table 1604.4, yaitu  $L/240$  atau 95,83 mm. Hal ini menunjukkan bahwa struktur masih aman terhadap deformasi.

Evaluasi terhadap beban gempa memberikan hasil yang berbeda. Penambahan berat struktur akibat PV Module mempengaruhi nilai gaya gempa karena gaya seismik berbanding lurus terhadap berat efektif (W). Kenaikan 14,25% pada berat struktur meningkatkan gaya gempa lebih dari 10%, sehingga evaluasi gempa juga wajib dilakukan (mengacu pada SNI 1726:2019). Hasil simulasi menunjukkan bahwa DCR akibat beban gempa meningkat signifikan, dari 1,562 menjadi 2,204. Angka ini menunjukkan bahwa struktur pada Hall 1 tidak memenuhi syarat ketahanan gempa sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019. Struktur mengalami overstress pada beberapa titik akibat kombinasi beban gempa dan berat tambahan.

Simulasi gaya dalam akibat beban gempa dilakukan dalam berbagai arah (seismic X, -X, Y, -Y) serta berbagai kombinasi crane, memperlihatkan bahwa terdapat peningkatan gaya dalam dan momen yang signifikan setelah penambahan PV Module. Kondisi ini perlu mendapat perhatian serius jika rencana instalasi PV tetap dilanjutkan. Sebagai tambahan, dilakukan evaluasi terhadap kondisi operasional crane. Diperoleh rekomendasi bahwa crane tidak boleh beroperasi bersamaan pada bentang runway beam yang sama, khususnya pada kapasitas maksimal. Hal ini bertujuan untuk menghindari beban terfokus yang berlebihan pada elemen struktur baja utama.

Berdasarkan hasil-hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa struktur gedung PT XXX masih layak digunakan untuk penambahan PV Module dari sisi beban gravitasi, namun perlu dilakukan perkuatan atau rekayasa tambahan dari sisi ketahanan gempa. Beberapa opsi mitigasi antara lain: penambahan bracing lateral, penguatan sambungan, serta penggantian elemen struktural yang menunjukkan  $DCR > 1$ . Struktur juga dapat dievaluasi ulang dengan mempertimbangkan aktualisasi data tanah (SPT) untuk mendapatkan nilai parameter gempa yang lebih presisi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan pentingnya pendekatan evaluatif menyeluruh dalam mengintegrasikan sistem energi terbarukan ke dalam struktur bangunan eksisting, terutama pada bangunan industri dengan fungsi operasional yang kompleks seperti keberadaan crane dan beban dinamis lainnya. Penelitian ini tidak hanya menyoroti aspek teknis ketahanan struktur terhadap beban tambahan dari PV module, namun juga mengaitkannya dengan wawasan persemenan, yaitu ilmu dan teknologi yang berkaitan dengan bahan bangunan, khususnya semen dan konstruksi beton.

Dalam konteks bangunan eksisting PT XXX, struktur utamanya menggunakan baja SS400 sebagai elemen dominan. Namun, pondasi dan beberapa elemen lantai serta dinding diyakini menggunakan material berbasis semen seperti beton bertulang, bata ringan dengan mortar semen, dan plesteran. Penambahan beban sebesar 14,25% akibat pemasangan PV module membawa implikasi terhadap elemen struktur bawah, khususnya pondasi yang berbahan dasar beton. Sayangnya, dalam laporan evaluasi, data tanah dan kapasitas pondasi tidak tersedia, sehingga pengaruh beban tambahan terhadap pondasi berbasis semen tidak dapat dianalisis secara menyeluruh.

Dalam perspektif persemenan, peningkatan beban vertikal dapat memicu retak halus pada pondasi beton jika struktur tidak dirancang untuk beban tambahan jangka panjang. Oleh karena itu, direkomendasikan penggunaan beton mutu tinggi (misalnya K-300 ke atas) untuk proyek sejenis ke depan, disertai dengan penguatan struktur beton eksisting. Pemasangan PV module juga memerlukan penetrasi atau pengikatan ke atap, yang umumnya dilapisi dengan pelat baja bergelombang dan mortar pelindung. Kegiatan ini harus memperhatikan ketahanan terhadap korosi serta penggunaan sealant berbasis semen atau mortar polimer untuk menghindari kebocoran air yang dapat merusak beton dan besi tulangan.

Dari sisi pemasangan struktur sekunder (bracket, pengikat), jika menggunakan angkur atau sambungan ke elemen beton, maka pemilihan chemical anchor atau semen ekspansif menjadi penting. Semen ekspansif memiliki keunggulan dalam pengisian celah dan penguatan sambungan terhadap gaya tarik dan geser. Dalam evaluasi struktur terhadap beban gravitasi, meskipun lendutan meningkat dari 42,08 mm menjadi 66,59 mm, struktur masih dalam batas

izin L/240. Namun, retakan mikro pada elemen beton dapat terjadi akibat perpindahan beban atau perbedaan modulus elastisitas antara baja dan beton. Hal ini perlu dimitigasi dengan pengecekan sambungan beton-baja.

Evaluasi beban gempa menunjukkan bahwa struktur baja mengalami peningkatan DCR dari 1,562 menjadi 2,204, melampaui batas aman. Dalam konteks persemenan, ini menunjukkan perlunya integrasi antara sistem perkuatan baja dan beton, misalnya dengan penambahan shear wall dari beton bertulang untuk meningkatkan kekakuan lateral bangunan. Struktur bangunan yang direncanakan dalam proyek energi terbarukan seperti ini idealnya sejak awal memperhitungkan integrasi antara baja struktural dan beton. Kolaborasi ini dikenal sebagai sistem struktur komposit yang menggabungkan kekuatan tarik baja dan kekuatan tekan beton. Penerapan ini sangat dianjurkan untuk efisiensi dan ketahanan.

Selain struktur utama, area sekitar bangunan seperti jalur instalasi kabel, inverter, dan jalur distribusi energi juga melibatkan konstruksi berbasis semen seperti tray beton dan saluran tertutup. Wawasan persemenan dalam perencanaan ini penting agar tidak terjadi kerusakan akibat suhu tinggi dari peralatan listrik. Secara keseluruhan, penggabungan teknologi struktur baja dan bahan bangunan berbasis semen memberikan hasil yang saling melengkapi. Struktur baja unggul dalam fleksibilitas dan kecepatan pemasangan, sementara beton dan bahan semen lain memberikan kestabilan dan ketahanan jangka panjang. Rekomendasi tambahan adalah bahwa setiap proyek pemasangan PV module di atap industri harus melakukan audit struktur bawah dan pondasi. Penggunaan bahan semen yang tepat, metode pemasangan angkur yang sesuai, serta perlindungan sambungan baja-beton akan menjadi kunci keberhasilan proyek energi terbarukan yang aman dan berkelanjutan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan struktur eksisting Gedung PT XXX terhadap rencana pemasangan photovoltaic (PV) module menggunakan metode Finite Element Method (FEM) pada perangkat lunak ANSYS. Luas PV module yang direncanakan sebesar 3520,97 m<sup>2</sup> dengan kapasitas 749,6 kWp dan berat tambahan sebesar 38.164 kg, atau sekitar 14,25% dari berat struktur eksisting sebesar 267.700 kg.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi beban gravitasi, nilai Demand to Capacity Ratio (DCR) berubah dari 0,812 menjadi 0,709 setelah pemasangan PV module. Lendutan maksimum meningkat dari 42,08 mm menjadi 66,59 mm, tetapi masih berada di bawah batas lendutan 95,83 mm atau L/240 yang digunakan dalam evaluasi. Dengan demikian, struktur masih memenuhi kriteria yang digunakan untuk pembebanan gravitasi dan lendutan.

Sebaliknya, pada kondisi pembebanan gempa, nilai DCR meningkat dari 1,562 menjadi 2,204. Nilai tersebut melebihi batas DCR sebesar 1 sehingga menunjukkan bahwa elemen struktur kritis tidak memenuhi kapasitas yang diperlukan pada kondisi pembebanan gempa yang dianalisis. Oleh karena itu, pemasangan PV module memerlukan evaluasi lanjutan dan perkuatan struktur, khususnya terhadap sistem penahan gaya lateral.

Dari perspektif persemenan, penambahan beban PV meningkatkan tuntutan pembebanan pada elemen struktur bawah yang berbasis beton, terutama pondasi dan elemen pendukung. Namun, karena data tanah dan kapasitas pondasi aktual tidak tersedia, pengaruh penambahan beban terhadap kapasitas pondasi belum dapat ditentukan secara kuantitatif dalam penelitian ini. Aspek tersebut menjadi keterbatasan penelitian dan perlu dikaji lebih lanjut melalui evaluasi interaksi tanah-struktur, pemeriksaan kondisi beton eksisting, serta analisis kapasitas pondasi.

Secara keseluruhan, penelitian menunjukkan bahwa integrasi sistem energi terbarukan pada bangunan industri tidak cukup dievaluasi berdasarkan kemampuan struktur terhadap beban gravitasi saja. Evaluasi terhadap beban gempa, kondisi struktur eksisting, elemen berbasis beton, dan sistem pondasi perlu dilakukan secara terpadu untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan retrofit bangunan. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan PV module masih aman terhadap beban gravitasi, namun menyebabkan kegagalan pada kondisi beban gempa. Hal ini menegaskan bahwa evaluasi struktur harus dilakukan secara menyeluruh sebelum implementasi sistem energi terbarukan. Dari perspektif persemenan, terdapat potensi degradasi pada elemen beton akibat beban tambahan dan interaksi material. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan integratif dalam desain dan retrofit bangunan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji interaksi tanah-struktur serta pengaruh jangka panjang terhadap durabilitas material.

## INFORMASI PENULIS

### Penulis Pertama dan Korespondensi

**Anni Rahmat** – Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia, Kompleks PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, Gresik, Indonesia 61122

Email: [anni.rahmat@uisi.ac.id](mailto:anni.rahmat@uisi.ac.id)

### Penulis Pendamping

**Yuni Kurniati** – Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia, Kompleks PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Gresik, Indonesia 61122

**Hadi Cahyono** – Departemen Manajemen, Universitas Internasional Semen Indonesia, Kompleks PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Gresik, Indonesia 61122

**Irvan Adhin Cholilie** – Departemen Teknologi Industri Pertanian, Universitas Internasional Semen Indonesia, Kompleks PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Gresik, Indonesia 61122

**Diva Alifia Insiroh** – Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia, Kompleks PT Semen Indonesia (Persero) Tbk Gresik, Indonesia 61122

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung penelitian ini khususnya Departemen Teknik Kimia dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Internasional Semen Indonesia (LPPM UIISI)

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Habert et al., “Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries,” 2020. doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.
- [2] S. Barbhuiya, B. B. Das, D. Adak, K. Kapoor, and M. Tabish, “Low carbon concrete: advancements, challenges and future directions in sustainable construction,” *Discover Concrete and Cement*, vol. 1, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s44416-025-00002-y.
- [3] B. P. Jelle, “Building integrated photovoltaics: A concise description of the current state of the art and possible research pathways,” 2016. doi: 10.3390/en9010021.
- [4] E. Biyik et al., “A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems,” 2017. doi: 10.1016/j.jestch.2017.01.009.
- [5] Y. Dai and Y. Bai, “Performance improvement for building integrated photovoltaics in practice: A review,” 2021. doi: 10.3390/en14010178.
- [6] A. Adefela and S. O. Oluwatoki, “Numerical Stress Analysis of Mounting Structures for Rooftop Solar Panels in Public Buildings,” *Journal of Engineering Advancements*, vol. 6, no. 04, 2026, doi: 10.38032/jea.2025.04.005.
- [7] Badan Standardisasi Nasional SNI 1726:2019, “SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung,” Badan Standardisasi Nasional, no. 8, 2019.
- [8] Y. Yao, Z. Wang, and L. Wang, “Durability of concrete under combined mechanical load and environmental actions: A review,” *J. Sustain. Cem. Based. Mater.*, vol. 1, no. 1–2, 2012, doi: 10.1080/21650373.2012.732917.
- [9] M. Girardi, C. Padovani, D. Pellegrini, M. Porcelli, and L. Robol, “Finite element model updating for structural applications,” *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 370, 2020, doi: 10.1016/j.cam.2019.112675.

## KONTRIBUSI PENULIS

Anni Rahmat melakukan pengumpulan, pengolahan data, dan menulis jurnal ilmiah. Hadi Cahyono melakukan pembuatan metodologi yang sesuai. Irvan Adhin Cholilie melakukan simulasi optimasi. Diva Alifia Insiroh membantu penulisan jurnal ilmiah.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara finansial maupun non-finansial, yang dapat mempengaruhi hasil penelitian, analisis, maupun interpretasi data dalam artikel ini.

## PERNYATAAN ETIKA

Seluruh penulis telah menelaah dan menyetujui isi penelitian ini untuk dipublikasikan.

## KETERSEDIAAN DATA

Data tersedia dengan permintaan kepada penulis.