

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Konsep Sistem Isolasi Dasar

Sistem isolasi dasar adalah teknologi yang bertujuan untuk mengurangi respons seismik dengan menempatkan perangkat elastomerik atau mekanis antara struktur atas dan pondasi. Prinsip utamanya adalah untuk memisahkan gerakan tanah dari struktur bangunan melalui fleksibilitas horizontal dan disipasi energi. Menurut Kelly dan Konstantinidis (2011), sistem ini bekerja dengan memperpanjang periode alami struktur (T) sehingga respons percepatan gempa berkurang signifikan dengan rumus seperti dibawah ini:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.1)$$

di mana (m) merupakan massa struktur dan (k) merupakan kekakuan lateral relatif.

Dengan mengurangi kekakuan melalui penggunaan isolator, periode struktur dapat meningkat dan menyebabkan struktur bergerak ke zona spektrum respons gempa dengan percepatan lebih rendah. Naeim dan Kelly (1999) menjelaskan bahwa perpanjangan periode ini mengurangi percepatan spektral hingga mencapai 70%, terutama pada gempa berfrekuensi menengah.

Persamaan gerak sistem terisolasi dengan satu derajat kebebasan dinyatakan seperti dibawah ini:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (3.2)$$

di mana ($\ddot{x}_g$) adalah percepatan tanah dan (c) adalah koefisien redaman.

Constantinoiu et al. (2007) menambahkan bahwa sistem isolasi efektif jika memiliki rasio periode terisolasi terhadap struktur tetap $(T_I / T_F) > 3$, sehingga menghasilkan reduksi percepatan 70% – 90%.

3.2 Karakteristik Elastomeric Isolator

Elastomeric isolator terdiri dari lapisan karet (elastomer) yang disusun secara bergantian dengan lapisan penguat kaku. Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI) merupakan evolusi dari isolator elastomer konvensional dengan mengganti lapisan baja penguat dengan lapisan serat kaca (*fiberglass*). Secara struktural, GFREI terdiri atas:

1. Lapisan karet (elastomer): berfungsi memberikan fleksibilitas
2. Lapisan (*fiberglass*): berfungsi memberikan kekakuan vertikal
3. Lapisan penutup atas dan bawah: berfungsi untuk distribusi beban
4. Sistem pengikat: berfungsi sebagai koneksi antara struktur dan pondasi

Proses manufaktur GFREI melibatkan tahapan penyusunan lapisan karet dan lembaran serat kaca secara bergantian, dilanjutkan dengan proses vulkanisasi pada temperatur dan tekanan tinggi, serta diakhiri dengan pengujian kualitas dan karakterisasi mekanis untuk memastikan performa isolator sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Dibandingkan dengan proses manufaktur isolator konvensional, GFREI dapat diproduksi dengan peralatan yang lebih sederhana dan biaya yang lebih ekonomis.

Beberapa parameter penting yang mempengaruhi efektivitas GFREI dalam meredam getaran seismic meliputi:

1. Ketebalan Lapisan Elastomer: Semakin tebal lapisan elastomer, semakin besar deformasi lateral yang dapat ditoleransi oleh isolator.
2. Rasio Kekakuan Vertikal-Lateral: Rasio ini mempengaruhi stabilitas isolator terhadap beban aksial. Rasio yang optimal diperlukan untuk memastikan isolator mampu menahan beban vertikal tanpa kehilangan fleksibilitas lateralnya.

3. Redaman Internal Material: GFREI dengan redaman internal yang lebih tinggi mampu menyerap lebih banyak energi gempa, sehingga dapat mengurangi respons dinamis struktur.
4. Beban Aksial pada Struktur: Beban vertikal yang berlebihan dapat mengurangi efektivitas isolasi GFREI. Oleh karena itu, desain isolator harus mempertimbangkan beban aksial maksimum yang akan diterima.

Perilaku histeresis GFREI dapat dimodelkan menggunakan model Bouc-Wen yang dimodifikasi, di mana parameter model untuk GFREI umumnya berbeda dari isolator konvensional karena karakteristik material yang berbeda. Faktor bentuk (*shape factor*) yang memengaruhi kekakuan vertikal GFREI juga menjadi pertimbangan penting dalam proses desain dan analisis performa isolator ini. Faktor bentuk (*S*) merupakan parameter penting dalam desain isolator elastomer yang didefinisikan sebagai berikut:

$$S = \frac{A_{loaded}}{A_{free}} \quad (3.3)$$

dimana (A_{loaded}) adalah luas permukaan yang dibebani dan (A_{free}) adalah luas permukaan bebas.

Penelitian yang dilakukan oleh Osgooci, Peyman et al. (2015) yang berjudul “Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)” menjelaskan bahwa faktor bentuk (*shape factor*) merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap performa isolator elastomerik. Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara isolator konvensional dan termodifikasi, di mana isolator persegi panjang konvensional dengan faktor bentuk 15-20 memiliki kekakuan vertikal tinggi namun rentan terhadap konsentrasi tegangan, sementara MR-FREI dengan faktor bentuk 10-15 menunjukkan kekakuan vertikal lebih rendah tetapi distribusi tegangan yang lebih merata.

Efektivitas modifikasi geometri terlihat jelas dengan peningkatan kapasitas deformasi lateral sebesar 15-20% dan pengurangan konsentrasi tegangan hingga 25% dibandingkan dengan isolator konvensional. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa optimalisasi faktor bentuk merupakan pertimbangan penting dalam desain isolator elastomerik untuk mencapai keseimbangan optimal antara kekakuan vertikal dan kapasitas deformasi lateral.

GFREI menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan isolator konvensional, termasuk berat yang lebih ringan yang memudahkan transportasi dan instalasi, biaya produksi yang lebih rendah sehingga mengurangi biaya total sistem isolasi, ketahanan terhadap korosi yang superior sehingga cocok untuk lingkungan agresif, transparansi terhadap gelombang elektromagnetik yang tidak mengganggu peralatan sensitif, kemudahan fabrikasi, serta fleksibilitas dalam desain geometri. GFREI memiliki potensi aplikasi yang luas terutama pada bangunan ringan dan menengah yang selama ini kurang tersentuh teknologi isolasi seismik karena pertimbangan biaya (Shahabi et al., 2020)

3.3 Model Histeretik *Bouc-Wen*

Model *Bouc-Wen* merupakan pendekatan matematis yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku histeresis nonlinier pada sistem struktural yang mengalami beban siklik. Pertama kali diperkenalkan oleh Robert Bouc pada tahun 1967, model ini dirancang untuk menggambarkan fenomena histeresis dalam sistem dinamik melalui penggunaan persamaan diferensial yang melibatkan variabel keadaan tambahan. Hal ini menjadikan model *Bouc-Wen* sangat relevan dalam menganalisis material dan struktur yang menunjukkan perilaku histeresis, seperti *base isolation* (termasuk jenis elastomerik isolator) maupun struktur beton bertulang

Pada tahun 1976, Yi-Kwei Wen memperluas model ini dengan memperkenalkan parameter tambahan, yaitu γ , β , dan n . Penambahan parameter ini memberikan fleksibilitas lebih dalam mereproduksi berbagai bentuk *loop* histeresis, termasuk perilaku *softening* (pelunakan) dan *hardening*

(pengerasan). Parameter γ dan β mengontrol bentuk dan ukuran loop histeresis, sementara parameter n menentukan ketajaman transisi antara fase elastis dan plastis. Nilai n yang lebih tinggi menghasilkan transisi yang lebih tajam, mendekati perilaku bilinear. Fleksibilitas ini memungkinkan model *Bouc-Wen* untuk disesuaikan dengan berbagai kondisi material dan struktural, baik dalam analisis serta desain.

Dalam implementasinya pada perangkat lunak analisis struktur seperti OpenSees, model *Bouc-Wen* digunakan untuk mensimulasikan perilaku histeresis material uniaxial. Parameter γ biasanya berada dalam rentang -1 hingga 1, sedangkan β berkisar antara 0 hingga 1. Kombinasi nilai γ dan β menentukan karakteristik loop histeresis yang dihasilkan: jika $\gamma + \beta > 0$, maka loop menunjukkan perilaku softening; jika $\gamma + \beta < 0$, menunjukkan hardening. Selain itu, parameter A dan n digunakan untuk mengontrol bentuk dan kelancaran transisi dari fase elastis ke fase pasca-elastis. Kemampuan model *Bouc-Wen* untuk merepresentasikan berbagai bentuk perilaku histeresis menjadikannya alat yang sangat berguna dalam perancangan sistem mekanis, struktur anti-seismik, dan peredam getaran.