

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

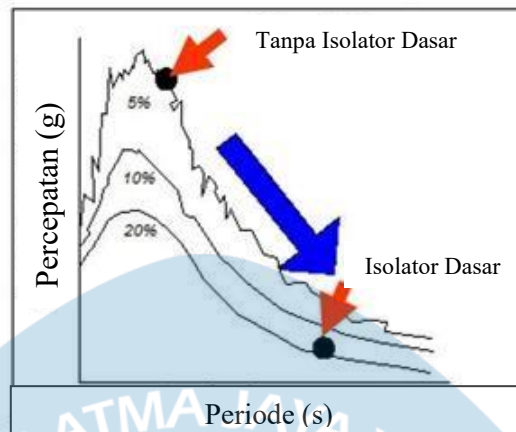
2.1 Sistem Isolasi Seismik dalam Rekayasa Gempa

Sistem isolasi dasar (*base isolation*) adalah teknologi yang dirancang untuk memisahkan struktur bangunan dari pergerakan tanah selama gempa, sehingga mengurangi transmisi energi seismik ke struktur bagian atas. *Base isolation* lebih dikenal dengan sebutan *Elastomeric Isolation*, karena sifat dasar elastomer atau bantalan karet yaitu mampu meregang apabila diberi tegangan dan berdeformasi secara cepat dan dapat kembali ke dimensi semula. Konsep dasar dari sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Kelly (1990) dan kini menjadi strategi utama dalam rekayasa gempa berbasis kinerja (*performance-based design*).

Berdasarkan penelitian Naeim dan Kelly (1999), prinsip kerja sistem isolasi dasar melibatkan dua mekanisme kunci:

1. Memperpanjang periode alami struktur untuk menjauhkannya dari rentang frekuensi dominan gempa seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1, serta
2. Meningkatkan kapasitas disipasi energi melalui material isolator.

Skinner et al. (1993) dalam studi eksperimentalnya membuktikan bahwa sistem ini mampu mengurangi percepatan lantai hingga 80% dibandingkan struktur tanpa isolasi. Pengurangan percepatan lantai yang signifikan ini dapat terjadi ketika periode getaran struktur juga meningkat secara signifikan. Sehingga dengan penambahan fleksibilitas dalam struktur untuk memperpanjang periode struktur akan menghasilkan peningkatan perpindahan relatif. Pengaplikasian sistem isolasi dasar tentunya dapat digunakan pada struktur dengan kekakuan tinggi, seperti bangunan tingkat rendah dan sedang, pembangkit listrik tenaga nuklir, maupun struktur jembatan (Kircher, 2003; Farissi, 2013).



Gambar 2. 1 Efek Pergeseran Periode pada Spektrum Akselerasi

(Sumber: Naeim, dkk, 2009; Farissi, 2013)

Buckle dan Mayes (1990) mengelompokkan sistem isolasi dasar menjadi dua kategori utama:

1. Sistem berbasis elastomer menggunakan bantalan karet berlapis yang diperkuat dengan pelat baja atau material komposit untuk memberikan fleksibilitas lateral sekaligus kekakuan vertikal.
2. Sistem berbasis geser mengandalkan mekanisme gesekan untuk menyerap energi gempa, seperti *Friction Pendulum System* (FPS).

Meskipun efektif, aplikasi sistem isolasi konvensional masih terbatas pada bangunan tinggi atau infrastruktur kritis yang disebabkan oleh biaya dan kompleksitas instalasi.

2.2 Isolator Elastomerik Konvensional

Penggunaan isolator elastomerik seperti *High Damping Rubber Bearing* (HDRB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB) telah menjadi standar global dalam rekayasa tahan gempa terutama pada struktur tingkat tinggi. HDRB memanfaatkan karet dengan redaman internal tinggi (10-15%) untuk meredam energi gempa, sedangkan LRB menambahkan inti timbal (*lead core*) yang meningkatkan redaman hingga 30% (Kelly dan Konstantinidis, 2011).

Karakteristik mekanis HDRB ditandai dengan modulus geser yang umumnya berkisar antara 0.4 hingga 1.4 MPa dan rasio redaman mencapai 10-20% pada regangan 100%. HDRB memiliki kekakuan horizontal yang rendah yang memungkinkan perpanjangan periode natural struktur, sekaligus mempertahankan kekakuan vertikal tinggi untuk menahan beban gravitasi dengan deformasi minimal. Sedangkan dari segi karakteristik mekanis, LRB memiliki modulus geser karet yang berkisar antara 0.4 hingga 0.8 MPa dengan rasio redaman yang mencapai 25-30% pada regangan 100%.

Namun, studi oleh Marin-Artieda et al. (2007) mengidentifikasi beberapa kelemahan kritis isolator konvensional:

1. Bobot tinggi: Massa per unit isolator mencapai 150-200 kg, menyulitkan instalasi pada struktur ringan.
2. Biaya produksi mahal: Kompleksitas manufaktur dan penggunaan material baja meningkatkan biaya hingga 40%.
3. Ketidakcocokan untuk struktur berlantai rendah: Kapasitas beban aksial minimal 50 kN tidak ekonomis untuk bangunan sederhana.

Morgan dan Mahin (2011) menegaskan bahwa isolator konvensional lebih cocok untuk infrastruktur bernilai tinggi seperti jembatan atau gedung perkantoran, sehingga kurang relevan untuk negara berkembang seperti Indonesia yang didominasi bangunan berlantai rendah.

2.3 Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolator (GFREI)

Glass Fiber Reinforced Elastomeric Isolators (GFREI) adalah salah satu inovasi dari sistem isolasi dasar yang cocok untuk diaplikasikan pada bangunan bertingkat rendah pada daerah dengan intensitas gempa tinggi. Hal ini bertujuan untuk memperpanjang periode fundamental alami, serta mengurangi akselerasi lantai selama peristiwa seismik. GFREI dikembangkan sebagai alternatif dengan mengganti pelat baja pada isolator konvensional seperti HDRB dan LRB dengan menggunakan serat kaca (*fiberglass*). Inovasi ini

pertama kali diusulkan oleh Kelly dan Takhirov (2001) untuk mengatasi keterbatasan isolator berbasis baja.

Keunggulan utama GFREI menurut Mordini dan Strauss (2008) meliputi:

1. Massa ringan: Hanya 25% dari isolator konvensional, memudahkan instalasi pada struktur berlantai rendah.
2. Ketahanan korosi: Serat kaca tahan terhadap kelembapan dan lingkungan agresif, ideal untuk iklim tropis.
3. Biaya produksi rendah: Proses manufaktur yang sederhana mengurangi biaya hingga 30-40%.

Keunggulan dari *fiber reinforced elastomeric isolator* (FREI) ini menjadi pemicu berkembangnya penelitian terhadap inovasi ini. Pengujian yang dilakukan oleh Das et al. (2014) dilakukan pada isolator berbentuk persegi (70×70 mm) atau lingkaran (diameter 150–200 mm), dengan ketebalan total 40–79 mm dan terdiri dari 3–5 lapisan karet (8–12 mm/lapisan) yang disusun bergantian dengan serat seperti karbon atau serat kaca setebal 0.2–1.0 mm. Material elastomernya menggunakan karet alam dengan kekerasan Shore A 40–60 dan modulus geser 0.4–1.0 MPa.

Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa isolator dengan serat karbon atau kaca mampu menghasilkan redaman efektif 10–15%, lebih tinggi dibandingkan isolator baja (5–8%). Kekakuan vertikal FREI tercatat 20–30% lebih rendah dari isolator baja, namun tetap stabil hingga 20 siklus beban dengan regangan geser 150–200%. Uji kombinasi beban vertikal (3.45–12 MPa) dan perpindahan lateral hingga 150 mm (frekuensi 0.1–2 Hz) menunjukkan performa baik, dengan penurunan percepatan struktur hingga 50–70% dan base shear hingga 60%.

Simulasi FEM di ABAQUS juga dilakukan untuk memvalidasi bahwa model Bouc-Wen mampu mereproduksi grafik histeretik dengan akurasi tinggi (error <10%) dan menunjukkan efisiensi reduksi tegangan lapisan hingga 30%.

GFREI dengan ketebalan karet 10–15 mm direkomendasikan untuk bangunan rendah di wilayah seismik.

Penelitian mengenai *Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings* (RR-FRBs) yang dikembangkan oleh Calabrese, A. et al. (2019) menunjukkan potensi besar dalam penerapan sistem isolasi seismik yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk bangunan perumahan di negara berkembang seperti Indonesia. RR-FRBs merupakan bantalan isolator yang terbuat dari karet daur ulang yang diperkuat dengan serat (seperti serat kaca), disusun secara berlapis tanpa proses vulkanisasi, dan dibentuk menggunakan perekat poliuretan. Benda uji memiliki bentuk persegi dengan dimensi sekitar 300 mm × 300 mm dan ketebalan total mencapai 100 mm, terdiri atas 10 hingga 12 lapisan karet dan serat dengan ketebalan masing-masing lapisan sekitar 8–10 mm.

Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa RR-FRBs memiliki kapasitas redaman histeretik yang baik, dengan redaman efektif sebesar 15–20%, serta perilaku nonlinear yang stabil pada deformasi besar. Hasil analisis menyimpulkan bahwa RR-FRBs mampu mereduksi respons seismik struktur secara signifikan, menjadikannya sebagai alternatif yang efektif dan berkelanjutan untuk mitigasi kerusakan bangunan akibat gempa bumi. Hal ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut terhadap isolator seismik berbahan dasar serat kaca dan karet daur ulang, seperti GFREI, untuk diterapkan secara luas di Indonesia.

Di Indonesia, riset GFREI mulai berkembang sejak dekade terakhir. Tavio dan Wijaya (2020) menguji prototipe GFREI berbahan dasar karet lokal dan menemukan kapasitas deformasi lateral hingga 150% dengan karakteristik histeretik stabil. Hasil ini menunjukkan potensi GFREI sebagai alternatif isolator konvensional, meskipun perlu validasi lebih lanjut pada kondisi seismik Indonesia.

2.4 OpenSees sebagai Platform Pemodelan Seismik

OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*) adalah platform *open-source* yang dikembangkan oleh Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) untuk simulasi respons seismik struktur dan sistem geoteknik. Keunggulan utamanya terletak pada fleksibilitas pemrograman menggunakan bahasa Tcl dan ketersediaan pustaka elemen nonlinier.

OpenSees mengintegrasikan empat elemen fungsional yang beroperasi secara terkoordinasi untuk memfasilitasi simulasi rekayasa gempa komprehensif. Arsitektur sistemnya dirancang dengan pendekatan modular yang memungkinkan pemodelan, analisis, dan interpretasi fenomena seismik secara menyeluruh. Empat elemen tersebut antara lain:

1. *Model Builder* : berfungsi sebagai fondasi dalam konstruksi membuat model struktural, yang didalamnya berisi komponen seperti menentukan *node*, elemen struktural dan material properti, input beban, serta penetapan *boundaries*.
2. *Domain* : komponen ini menyimpan dan memperbarui data terkait kondisi sistem pada interval temporal tertentu, seperti status pada waktu t atau waktu berikutnya ($t + \Delta t$).
3. *Analysis* : proses ini melibatkan implementasi sistem solver matematika, mekanisme integrasi temporal seperti metode Newmark atau Hilber-Hughes-Taylor, algoritma iteratif seperti Newton-Raphson, serta pendekatan analisis yang sesuai dengan kebutuhan investigasi, baik itu statis, dinamis, maupun nonlinier.
4. *Recorder* : melaksanakan fungsi dokumentasi dengan mencatat parameter-parameter esensial yang ditentukan peneliti selama proses analisis. Data yang direkam dapat mencakup perpindahan nodal, deformasi elemen struktural, atau respons material.

Schellenberg (2016) mengembangkan modul isolator elastomerik di OpenSees, termasuk model *Bouc-Wen* untuk simulasi histeresis.

Pengembangan ini terdapat pada tipe *element* dalam OpenSees yaitu element *elastomericBearingBoucWen*.

Sintaks :

```
element elastomericBearingBoucWen $eleTag $iNode $jNode $kInit $qd  
$alpha1 $alpha2 $mu $eta $beta $gamma -P $matTag -Mz $matTag <-orient  
$x1 $x2 $x3 $y1 $y2 $y3> <-shearDist $sDratio> <-doRayleigh> <-mass $m>
```

Keterangan :

1. \$eleTag - tag unik untuk identifikasi elemen
2. \$iNode \$jNode - node awal dan node akhir elemen
3. \$kInit - kekakuan elastis awal dalam arah geser lokal
4. \$qd - kekuatan karakteristik (yield strength)
5. \$alpha1 - rasio kekakuan pasca-leleh untuk komponen pengerasan linier
6. \$alpha2 - rasio kekakuan pasca-leleh untuk komponen pengerasan non-linier
7. \$mu - eksponen untuk komponen pengerasan non-linier
8. \$eta - eksponen yield (menentukan ketajaman sudut Grafik histeresis, default = 1.0)
9. \$beta - parameter bentuk histeresis pertama (default = 0.5)
10. \$gamma - parameter bentuk histeresis kedua (default = 0.5)
11. -P \$matTag - tag material Uniaxial untuk aksial (arah sumbu lokal x)
12. -T \$matTag - tag material Uniaxial untuk torsi (rotasi sumbu lokal x)
13. -My \$matTag - tag material Uniaxial untuk momen sumbu lokal y
14. -Mz \$matTag - tag material Uniaxial untuk momen sumbu lokal z
15. \$x1 \$x2 \$x3 - komponen vektor dalam koordinat global untuk sumbu lokal x
16. \$y1 \$y2 \$y3 - komponen vektor dalam koordinat global untuk sumbu lokal y
17. \$sDratio - jarak geser dari iNode sebagai fraksi panjang elemen (default = 0.5)

18. -doRayleigh - opsi untuk memasukkan redaman Rayleigh (default = tidak aktif)

19. m - massa elemen (default = 0.0)

Poin 1 – 7 merupakan parameter dasar dari benda uji, poin 8 – 10 merupakan parameter pembentuk histeretik, poin 11 – 14 merupakan material atau properti yang sudah diketahui, sedangkan poin 15 – 19 merupakan parameter opsional.

