

APLIKASI PENGGUNAAN KARET ALAM SEBAGAI ALAT PEREDAM GEMPA PADA BANGUNAN RUMAH TINGGAL SEDERHANA

Seismic Bearing Application Using Natural Rubber for Residential Housing

Usman WIJAYA^{1*}, RACHMANSYAH¹, Adi CIFRIADI², Santi PUSPITASARI², dan Asron. F. FALAAH²

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Kristen Krida Wacana.
Jalan Tanjung Duren Raya, No. 4, Jakarta Barat 11470, DKI Jakarta

²Balai Penelitian Teknologi Karet, Pusat Penelitian Karet
Jalan Salak No. 1, Bogor 16128, Jawa Barat

Diterima : 21 Maret 2021 / Disetujui : 31 Agustus 2021

Abstract

The design concept of using base isolator is dissipation energy, the absorption of earthquake forces by separating the structure of the building above it from the ground. The safety aspect is often neglected for residential housing. This is mainly related to the detailing of rebar reinforcement is often neglected in the implementation under the pretext of reducing construction costs. Solution for the two problems above is to introduce the use of base isolator. This base isolator was developed from the engineering process and the manufacture of the basic material of rubber compound to suit its designation as a seismic isolator. A layer of woven roving fiberglass reinforcement is used as a substitute for steel plate which is economically cheaper and can be applied. The application of the use of base isolator is carried out by testing the rubber material and analyzing the base isolator numerically to produce mechanical properties and the damping ratio of 9 percent. The damping ratio value is used as an input data into simulation of earthquake-resistant buildings with eleven ground motion earthquake records. From the simulation results, it was found that the behavior of using base isolator was able to increase the performance of the building.

Keywords: *base isolator, damping ratio, earthquake, fiberglass, rubber*

Abstrak

Konsep desain penggunaan karet peredam gempa adalah energi disipasi, yaitu penyerapan gaya gempa sebelum masuk ke bangunan dengan cara pemisah struktur bangunan di atasnya dari tanah yang merupakan pusat sumber kedatangan gempa. Aspek keamanan pelaksanaan pembangunan terutama untuk perumahan rakyat seringkali terabaikan. Hal ini terutama berkaitan dengan pendetailan tulangan baja yang merupakan aspek penting dalam kriteria bangunan tahan gempa yang kerap kali terabaikan di dalam pelaksanaan baik secara tidak disengaja maupun disengaja dengan dalih menekan biaya pembangunan agar nilai bangunan lebih ekonomis. Dengan pertimbangan kedua permasalahan di atas, maka solusi yang paling elegan dan memungkinkan untuk negara berkembang seperti Indonesia dimana sebagian besar penduduknya menghuni perumahan rakyat daripada apartemen bertingkat adalah mengenalkan penggunaan karet peredam gempa. Karet peredam gempa berfungsi sebagai penyekat atau peredam agar gaya gempa sebelum merambat masuk ke struktur bangunan dapat diredam. Peredam gempa ini dikembangkan mulai dari teknik proses dan pembuatan bahan dasar kompon karet agar tepat sesuai dengan peruntukannya sebagai bahan *isolator* (pemisah). Untuk perkuatan

digunakan lapisan *reinforcement woven roving fiberglass* sebagai pengganti pelat baja yang secara nilai ekonomi lebih inovatif dan dapat diaplikasikan. Aplikasi penggunaan karet peredam gempa dilakukan dengan pengujian material karet dan menganalisa karet peredam gempa tersebut secara numerik untuk menghasilkan sifat mekanik dan nilai redaman disipasi energi sebesar 9 persen. Nilai rasio redaman tersebut dimasukkan ke dalam simulasi bangunan rumah tinggal tahan gempa menggunakan software ETABS dengan sebelas rekaman gempa yang pernah terjadi. Dari hasil simulasi diperoleh perilaku bangunan rumah tinggal menggunakan karet peredam gempa mampu menaikan performa bangunan, dari yang sebelumnya tanpa karet peredam gempa bangunan mengalami kerusakan saat terjadi gempa, setelah diaplikasikan karet peredam gempa bangunan tidak mengalami kerusakan.

Kata kunci: ekonomis, karet, peredam gempa, perumahan rakyat

PENDAHULUAN

Karet alam sering digunakan pada industri manufaktur otomotif sebagai alat peredam getaran. Pada bangunan rumah tinggal sederhana karet alam dapat digunakan juga sebagai alat peredam getaran, yaitu getaran gempa. Getaran gempa yang terjadi, datang dari tanah kemudian merambat ke struktur bangunan rumah tinggal, dan merusak struktur rumah tinggal (Tsiavos et al., 2020). Bangunan rumah tinggal khususnya rumah tinggal sederhana yang dibangun tidak melalui proses perhitungan dan analisis oleh ahli konstruksi sering rusak bahkan rubuh ketika terjadi gempa bumi. Untuk mengurangi kerusakan dan korban jiwa ketika terjadi gempa bumi, karet peredam gempa dapat digunakan, karena konsep karet peredam gempa dapat meredam dan mendisipasi gaya gempa yang datang dari tanah dengan karet peredam yang dipasang dibawah kolom bangunan, sehingga ketika terjadi gempa bumi getaran gempa tidak sampai merusak struktur atas bangunan rumah tinggal (Wijaya & Kusumawati, 2021).

Penggunaan karet peredam gempa sangat efektif untuk mendisipasi energi gempa, tetapi harganya yang sangat mahal akan menjadi pertimbangan yang berat bagi pemilik untuk menggunakannya (Calabrese et al., 2019). Untuk itu perlu adanya terobosan dan inovasi dalam pembuatan karet peredam gempa. Karet peredam gempa umumnya menggunakan *filler* yang mahal dalam campuran karet dan lapisan baja di antara lapisan karet dalam pembuatan karet peredam gempa. Inovasi yang dilakukan untuk mendapatkan suatu produk karet peredam gempa adalah dengan memodifikasi komposisi *filler* dan mengganti lapisan baja dengan lapisan *glass fiber*.

Penelitian yang dilakukan oleh Sierra et al. (2019) menganalisa dan membandingkan lapisan baja dengan lapisan *carbon fiber* dan *nylon fiber* pada karet peredam gempa untuk bangunan rumah tinggal dengan parameter yang diuji adalah *mechanical properties* karet seperti *hardness*, *uniaxial tension*, *compression set*, dan *shear* untuk bahan dasar karet dan pengujian horizontal dan vertikal untuk penampang karet peredam gempanya secara keseluruhan. Hasilnya, karet peredam gempa dengan lapisan *carbon fiber* memiliki nilai rasio redaman yang paling tinggi yaitu sebesar 10,2 persen tetapi kekakuan efektif paling rendah yaitu 175 kN/m dibandingkan dengan karet peredam gempa menggunakan lapisan baja ataupun *nylon fiber*. Untuk bangunan rumah tinggal, meskipun kekakuan efektifnya rendah, hal ini tidak menjadi masalah, karena bangunan rumah tinggal memiliki gaya aksial yang relatif kecil, namun jika pada bangunan tinggi, nilai kekakuan efektif rendah akan menjadi masalah (Sierra et al., 2019).

Karet alam dengan nilai modulus geser 0,55 MPa dan nilai elongasi pada saat putus 500% dapat digunakan untuk menghasilkan karet peredam gempa inovatif untuk bangunan rumah tinggal. Lapisan antar karet diisi dengan lapisan *perforated glass fiber* untuk menahan beban rumah tinggal. Dari hasil pengujian eksperimental diperoleh kekakuan vertikal sebesar 4.045 kN/m sedangkan kekakuan efektif lateral adalah 442 kN/m dan nilai rasio redaman adalah 4,4 persen. Karet peredam gempa

dengan karakteristik nilai rasio redaman 4,4 persen sangat cocok digunakan untuk rumah tinggal karena memiliki nilai redaman dan kekakuan vertikal yang tidak terlalu tinggi sejalan dengan beban aksial rumah tinggal yang tidak terlalu besar dan gaya geser akibat gempa untuk bangunan rumah tinggal yang tidak terlalu besar (Tavio & Wijaya, 2020).

Pendekatan dua tahap diusulkan untuk mengidentifikasi sifat nonlinier bantalan karet dengan model tumpuan bebas pada bagian pondasi untuk mengisolasi respons seismik pada bangunan. Pada tahap pertama, parameter struktur bangunan dapat diestimasi berdasarkan pendekatan Kalman Filter ketika struktur mengalami gempa arah sumbu lemah dan karet peredam gempa dasar dalam keadaan linier. Pada langkah kedua, gaya bolak-balik dalam grafik histeretik nonlinier dari karet peredam gempa dasar, diperlakukan sebagai input fiktif yang tidak diketahui sistem strukturalnya bangunan dianalisis tanpa karet peredam gempa, dan secara bersamaan diidentifikasi sebagai sistem struktural menggunakan algoritma *GKF-UI* ketika struktur bangunan mengalami gempa kuat dan karet peredam gempa dasar berada dalam keadaan nonlinier. Untuk menghindari masalah pada *story-drift* dalam identifikasi perpindahan dan input data elemen fusi fiktif yang tidak diketahui dari respon regangan dan percepatan yang terukur digunakan dalam persamaan matematikanya. Dari dua tahapan metode analisis karet peredam gempa dasar tersebut, metode yang diusulkan ini mampu mengidentifikasi gaya histeretik bolak-balik karet peredam gempa dasar dengan pengukuran respon dinamik struktural secara parsial. Pendekatan inovasi tersebut dapat mengatasi keterbatasan metode sebelumnya. Dan juga mampu mengamati respon percepatan di lokasi dipasangnya karet peredam gempa dasar. Untuk validasi kinerja metode yang diusulkan, dua contoh simulasi numerik tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi gaya histeretik bolak-balik karet peredam gempa dasar dalam model yang berbeda dan menghasilkan akurasi yang baik. Dua metode tersebut dapat diterapkan pada kasus-kasus ketika gempa telah diketahui

tetapi identifikasi karakteristik sistem karet peredam gempa dasar ketika gempa tidak diketahui belum dapat dilakukan dan perlu pembuktian pengujian eksperimental di masa depan (Yang et al., 2020).

Studi tentang sifat mekanikal dan fisikal kompon karet untuk peredam gempa lapisan baja atau biasa disebut *Steel Reinforced Elastomeric Isolator (SREI)* berbahan dasar karet alam dan karet sintesis *Styrene Butadiene Rubber (SBR)* sebagai komponen utamanya dan menggunakan pelat baja sebagai lapisan pengkakuanya dilakukan dengan memodifikasi formula karet alam (NR) dengan bahan kimia vulkanisasi diantaranya yaitu memodifikasi formula *filler* yaitu *Carbon Black (CB)* dan VN3. Pengujian sifat fisikal dan mekanikal mengacu pada persyaratan uji standar *ISO*. Hasil pengujian mengungkapkan efek modifikasi komponen *filler* berdampak pada peningkatan kekerasan, *compression set*, modulus geser, dan kuat tarik serta penurunan elongasi dapat dilakukan dengan cara melakukan modifikasi kompon secara sinergi diantaranya dengan meningkatkan jumlah CB, mengganti SBR, dan mengubah sistem vulkanisasi menjadi vulkanisasi efisien sedangkan silika VN3 tidak berefek meningkatkan sifat fisikal maupun mekanikal. Dari peningkatan sifat fisikal dan mekanikal nilai rasio redaman juga ikut meningkat (Koupai et al., 2017).

Pada penelitian ini karet peredam gempa menggunakan karet alam dengan lapisan *fiberglass* sebagai lapisan *reinforcement*. Kompon karet dan lapisan *fiberglass* sebagai *reinforcement* menggantikan pelat baja bertujuan menekan biaya produksi karet peredam gempa. Desain campuran lapisan *fiberglass* diperhitungkan khusus untuk bangunan rumah tinggal sederhana menyesuaikan spesifikasi yang dibutuhkan dan kombinasi kekakuan vertikal dan horizontal yang tepat. Karet peredam gempa ini dibuat menggunakan bahan-bahan lokal agar dapat menekan biaya produksi. Sehingga dengan karet peredam gempa kedepannya seluruh rumah tinggal sederhana akan menggunakan karet peredam gempa dan tidak akan ada lagi korban jiwa akibat gempa bumi.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penyusun Kompon Karet

Dalam perancangan formula karet, karet yang dipilih sebagai bahan utama dalam penelitian ini adalah karet remah *Standard Indonesian Rubber grade SIR 20* dan bahan kimia tambahan penyusun komponen karet sebagai aditif yang terdiri atas *Zinc oxide (ZnO)*, Asam Stearat, *Trimetil 1.2*

dihidroquinolin (TMQ), *N-(1.3 dimetil butyl)-N-fenil p fenilindiamin (6PPD)*, *Parafin wax*, *Carbon Black N330*, minyak aromatik, *Aktiplus T60*, *coumarone resin*, *N-sikloheksil 2 bensotiasol sulfenamid (CBS)*, dan *sulfur*. Susunan formulasi komponen karet dapat dilihat pada Tabel 1 dalam satuan *bsk* (bagian seratus karet) yang terdiri atas empat tipe sampel yaitu sampel AC1, AC2, AC3, dan AC4.

Tabel 1. Formulasi komponen karet tahan gempa
Table 1. Seismic rubber compound formulation

| No No | Bahan Material | Fungsi Function | Dosis (bsk) Dose (phr) | | | |
|----------|-------------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | | | AC 1 | AC 2 | AC 3 | AC 4 |
| 1 | SIR 20 | Polimer dasar | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 2 | ZnO | Bahan pengaktif | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| 3 | Asam Stearat | Bahan pengaktif | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| 4 | TMQ | Bahan antioksidan | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| 5 | 6PPD | Bahan antioksidan | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| 6 | Parafin wax | Bahan antiozonan | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| 7 | Coumarone resin | Bahan pengeras | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| 8 | Aktiplus T60 | Bahan bantu olah | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| 9 | Carbon Black N330 | Bahan pengisi | 40,0 | 45,0 | 40,0 | 45,0 |
| 10 | Minyak aromatik | Bahan pelunak | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| 11 | CBS | Bahan pencepat | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 |
| 12 | Sulfur | Bahan pemvulkanisasi | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Dari Tabel 1 dapat terlihat bahwa variasi dosis bahan pengisi (*CB N330*) dan sistem vulkanisasi dengan mengatur rasio *CBS* dan *sulfur* ditetapkan sebagai variabel percobaan. Kedua variabel tersebut diperhitungkan akan berpengaruh signifikan dalam menentukan kekerasan komposit karet yang berdampak terhadap kemampuan redaman komposit karet tersebut. Susunan formula komponen karet dinyatakan dalam satuan bagian seratus karet (*bsk*).

Pembuatan Kompon dan Vulkanisat Karet

Prosedur eksperimen yang diterapkan dalam riset mengacu pada ASTM D 3182-16 (*Standard Practice for Rubber Material*). Proses pembuatan komponen karet diawali dengan memastikan karet SIR 20 dalam mesin giling terbuka skala laboratorium sehingga karet menjadi plastis atau lunak. Proses mastikasi menyebabkan

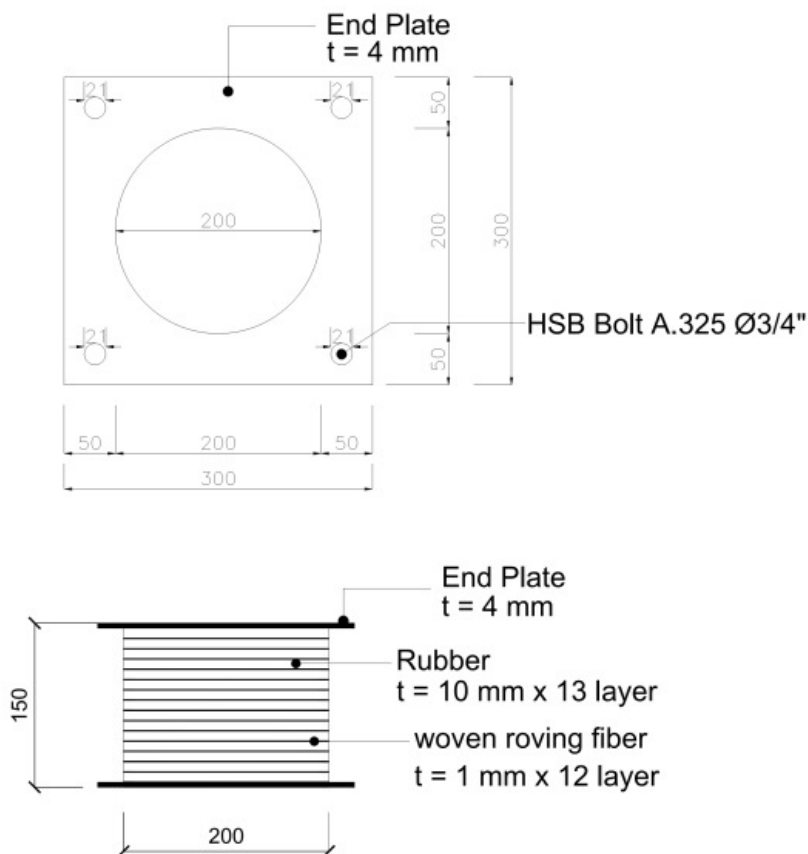
terputusnya rantai molekul karet secara fisik yang ditandai dengan berkurangnya viskositas karet. Selanjutnya, ke dalam matriks karet yang telah lunak ditambahkan dengan bahan kimia komponen mengikuti urutan sebagai berikut *coumarone resin*, *ZnO*, asam stearat, *Aktiplus T60*, *CB N330*, minyak aromatik, *TMQ*, *6PPD*, *paraffin wax*, *CBS*, dan terakhir *sulfur*. Ketika seluruh bahan kimia komponen karet telah ditambahkan dan dicampurkan dengan karet, kemudian komposit karet yang terbentuk terus digiling (*blending* dan *remilling*) agar terbentuk komponen karet yang homogen. Kompon karet yang diperoleh pada akhir proses dibentuk menjadi lembaran, ditutup dengan lapisan plastik transparan anti lengket dan didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam. Maturasi komponen karet bertujuan agar bahan kimia komponen karet dapat mencapai fase *conditioning* dalam matriks karet, stabil, dan tidak terjadi eksesi reaksi lanjutan.

Metode Pengujian Karet Peredam Gempa

Parameter pengujian sifat mekanik komposit karet mengacu pada EN 15129 meliputi kekerasan IRHD (ISO 48, Frank Durometer), kuat tarik (ISO 37 Tipe 2, UTM MTS), perpanjangan putus (ISO 37 Tipe 2, UTM MTS) pada kondisi sebelum dan setelah pengusangan yang dipercepat (ISO 188), pampatan tetap (ISO 815 Tipe A, E-set tester), kuat sobek (ISO 34 Metode A, UTM MTS), serta ketahanan ozon (ISO 1431-1, Ozone Chamber Toyoseiki). Sementara karakterisasi sifat dinamik yang meliputi parameter *dynamic shear modulus* dan *damping property* mengikuti prosedur standar yang tercantum dalam ISO 1827:2016 menggunakan instrument UTM MTS (kapasitas beban 10 kN) (BS-EN 15129, 2009).

Aplikasi Karet Peredam Gempa dalam Bangunan Rumah Tinggal Sederhana

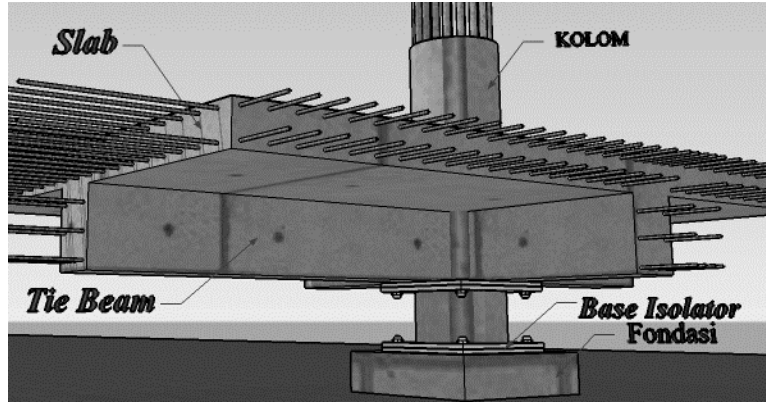
Dalam aplikasi karet peredam gempa ke dalam bangunan dibutuhkan data *properties* karet peredam gempa sebagai data *input* dalam mensimulasi penerapan karet peredam gempa dalam bangunan rumah tinggal sederhana. Data *input* yang dibutuhkan diantaranya data tegangan regangan hasil pengujian kuat tarik karet sebagai *input* dalam menganalisa perilaku karet peredam gempa. Setelah perilaku karet peredam gempa didapatkan, langkah selanjutnya adalah mendesain dimensi karet peredam gempa. Dimensi karet peredam gempa yang akan digunakan sebagai alat peredam dalam bangunan rumah tinggal sederhana dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Detail dimensi karet peredam gempa
 Figure 1. Detailed dimensions of seismic rubber base isolator

Sedangkan posisi karet peredam gempa jika diaplikasikan di dalam bangunan rumah tinggal sederhana berada di antara

bagian atas pondasi dan bagian bawah kolom seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Posisi karet peredam gempa dalam bangunan
 Figure 2. Position of seismic rubber base isolator in the building

Dari dimensi karet peredam gempa pada Gambar 1, dihasilkan *properties* berupa rasio redaman, kekakuan vertikal, dan kekakuan horizontal yang digunakan sebagai data input ke dalam pemodelan

simulasi aplikasi karet peredam gempa menggunakan program bantu ETABS. Nilai rasio redaman dapat dihitung dengan persamaan (1) (Kelly & Calabrese, 2012).

$$\xi = \frac{W_d}{4\pi W_s} \dots\dots\dots (1)$$

dimana W_d mewakili besarnya energi yang diserap sama dengan luasan area kurva histeretik dan W_s merupakan energi elastik

yang ditentukan dengan menggunakan rumus pada persamaan (2) (Kelly & Calabrese, 2012).

$$W_s = \frac{K_{eff} \Delta_{max}^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

dan Δ_{max} adalah rata-rata perpindahan yang didefinisikan sesuai dengan persamaan (3)

(Kelly & Calabrese, 2012).

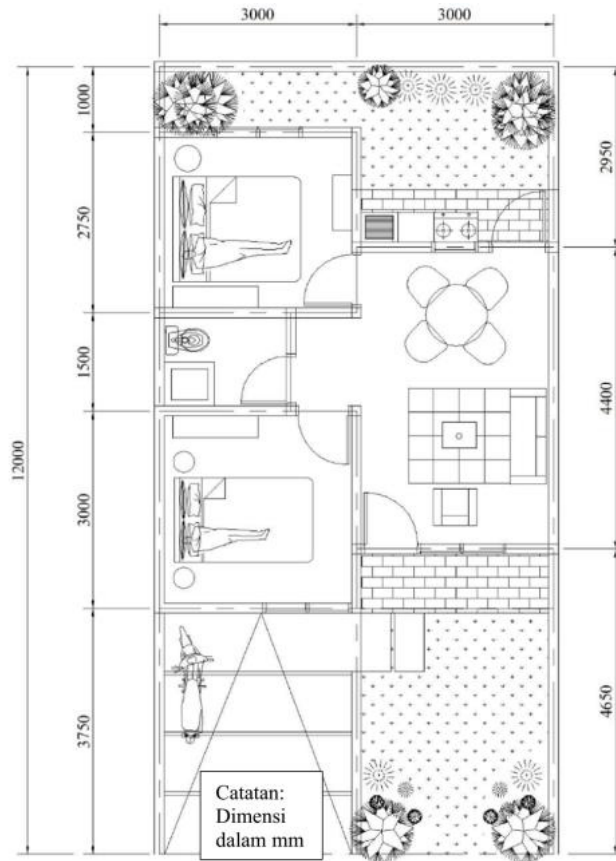
$$\Delta_{max} = \frac{d_{max} + |d_{min}|}{2} \dots\dots\dots (3)$$

Penggunaan karet peredam gempa dapat memperpanjang periode getar bangunan (NEHRP FEMA-451B, 2006). Bangunan rumah tinggal merupakan bangunan tingkat rendah yang umumnya memiliki periode getar rendah dan rawan terjadi kerusakan dan bahkan rubuh bila terjadi gempa. Hal ini sering disebabkan karena kurangnya perhatian mengenai pendetailan penulangan pada bangunan rumah tinggal khususnya perumahan rakyat. Karena keamanan masyarakat

sehingga pembangunan rumah tinggal (bukan rumah mewah) sering diserahkan kepada pelaksana non ahli (tidak bersertifikat) yang tidak melakukan perhitungan dan analisis struktur. Dengan menggunakan karet peredam gempa diharapkan daktilitas yang tidak diperoleh dari pendetailan tulangan yang benar, dapat digantikan dengan keberadaan karet peredam gempa melalui mekanisme disipasi energi gempa dari tanah sebelum masuk ke bangunan (Wijaya & Kusumawati, 2021).

Bangunan rumah tinggal sederhana diasumsikan dibangun di Jakarta dengan parameter tanah adalah tanah lunak. Denah rumah tinggal sederhana yang menjadi

model untuk aplikasi karet peredam gempa dapat dilihat pada Gambar 3. persamaan (3) (Kelly & Calabrese, 2012).



Gambar 3. Denah rumah tinggal sederhana
Figure 3. Residential housing floor plans

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Sifat Komposit Karet

Kompon karet yang telah dimaturasi selama 24 jam kemudian dicuplik sekitar 50 g sebagai sampel uji karakteristik vulkanisasi. Uji karakteristik vulkanisasi

dilaksanakan dalam instrumen *Moving Die Rheometer (Alpha 2000)* pada suhu 150°C selama 30 menit dapat dilihat pada Tabel 2.

Kecepatan torsi maksimum (S'maks, MH) dihasilkan dari spesimen AC4, sedangkan kecepatan torsi minimum (S'min, ML) diperoleh dari spesimen AC3. Selisih

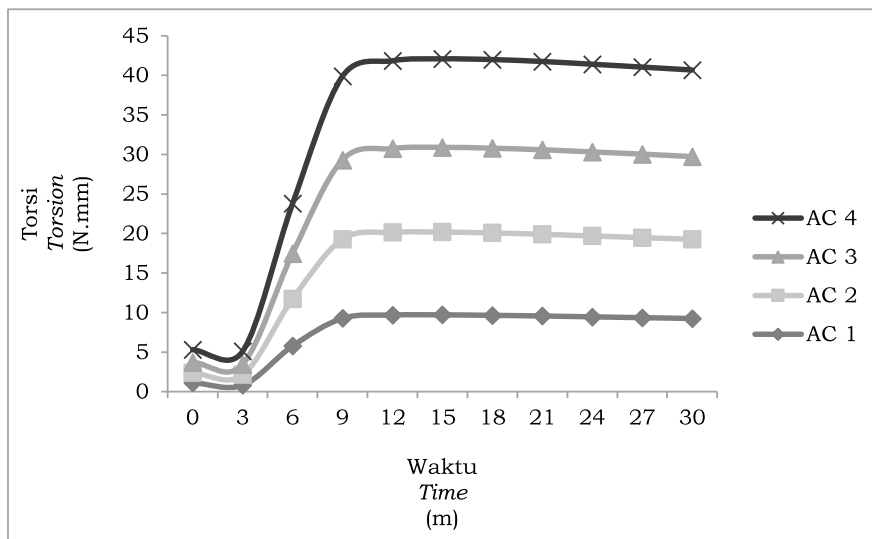
Tabel 2. Hasil rheometer kompon karet tahan gempa
Table 2. Rheometer results of earthquake-resistant rubber compound

| Parameter Parameter | Unit Unit | AC 1 | AC 2 | AC 3 | AC 4 |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| S' maks, MH | dNm | 9,73 | 10,49 | 10,74 | 11,22 |
| S' min, ML | dNm | 0,61 | 1,13 | 0,37 | 1,49 |
| S' maks - min | dNm | 9,12 | 9,36 | 10,37 | 9,73 |
| t ₉₀ | Min:sec | 8,00 | 8,06 | 8,19 | 8,17 |
| ts2 | Min:sec | 5,03 | 5,13 | 5,03 | 5,18 |
| CRI | | 33,67 | 34,13 | 31,65 | 33,44 |

dari nilai kecepatan torsi maksimum dan minimum ($S'_{maks} - min$) akan memengaruhi nilai modulus geser. Durasi proses vulkanisasi optimal (t_{90}) dipengaruhi dari variasi dosis *carbon black* dan dosis CBS pada spesimen AC1 sampai AC4. CBS adalah bahan pencepat dan bersifat basa sedangkan *carbon black* bersifat asam tetapi dapat memperlambat proses pematangan, tugasnya sebagai bahan pengisi. Kedua bahan ini jika dicampurkan akan bereaksi dan satu sama lain akan saling mempercepat dan memperlambat proses pematangan. Dari dosis *carbon black* pada formula kompon karet pada Tabel 1 terlihat AC 1-2 adalah 40-45 bsk, begitu juga AC 3-4

adalah 40-45 bsk, sedangkan dosis CBS AC 1-2 adalah 1,5 bsk dan AC 3-4 adalah 2 bsk. Pada Tabel 2 terlihat durasi pematangan dan vulkanisasi AC1 adalah yang paling optimal. Waktu vulkanisasi optimal (t_{90}) yang diperoleh dari hasil pengujian karakteristik vulkanisasi digunakan sebagai dasar dalam menentukan kondisi pencetakan kompon menjadi vulkanisat potongan sampel uji dalam mesin cetak hidraulik dapat dilihat pada Gambar 4.

Dari Gambar 3 terlihat karet kode AC1 sampai AC4 terjadi fase pravulkanisasi awal di bawah menit ke-5 dengan nilai torsi di atas 1,5 N-m. Fase pravulkanisasi dapat



Gambar 4. Durasi vulkanisasi optimal dari rheometer
 Figure 4. Optimal vulcanization duration of the rheometer

memengaruhi sifat *hyperelastic* karet nantinya. Penggunaan karbon sebagai filler turut mempercepat fase pravulkanisasi. Dengan mempercepat fase pravulkanisasi pada nilai torsi rendah akan sangat menguntungkan produksi sebuah base isolator. Fase pravulkanisasi sangat menentukan karakteristik karet, karena proses pencampuran senyawa kimia terjadi pada fase pravulkanisasi. Setelah melewati fase pravulkanisasi, selanjutnya adalah fase vulkanisasi, pada fase ini terlihat karet kode

AC1 sampai AC4 berada di atas 5 N-m, dimana standar nilai torsi minimum pada fase vulkanisasi adalah 5 N-m. Nilai torsi minimum ini menggambarkan tingkat viskositas kompon karet yang digunakan sebagai karet peredam gempa. Hasil pengujian sifat mekanik komposit karet peredam gempa dapat dilihat pada Tabel 3.

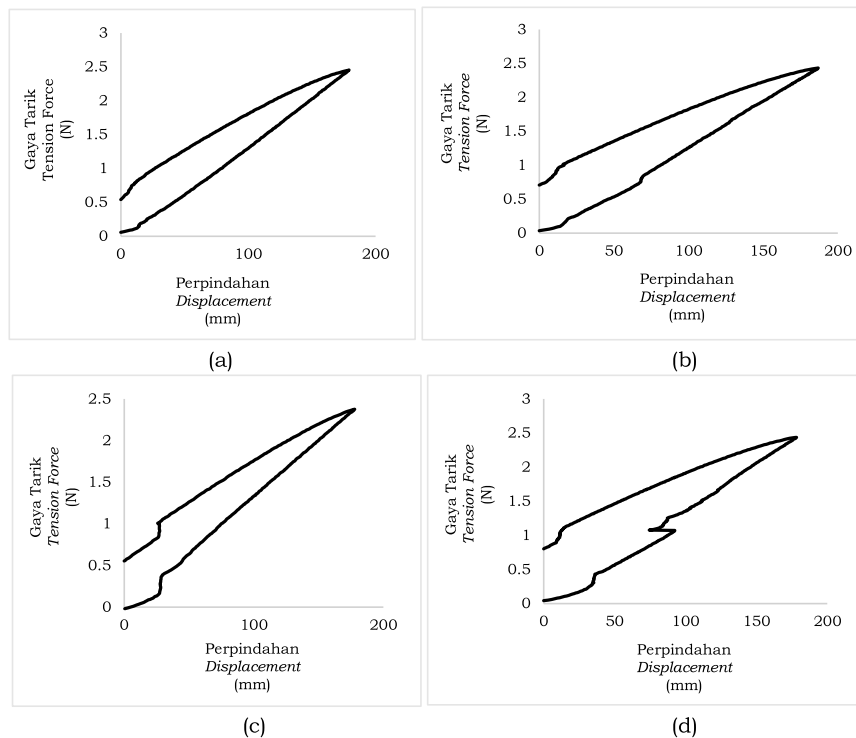
Hasil pengujian sifat mekanik dan sifat dinamik karet peredam gempa pada Tabel 3, digunakan untuk menentukan sifat

Tabel 3. Parameter pengujian sifat mekanik karet peredam gempa
 Table 3. Parameters for testing the mechanical properties of seismic rubber base isolator

| Parameter Parameter | Satuan Unit | AC 1 | AC 2 | AC 3 | AC 4 | EN 15129 |
|------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Hardness before aging | IRHD | 58,00 | 59,00 | 57,00 | 60,00 | |
| Hardness after aging | IRHD | 59,50 | 61,50 | 58,50 | 61,00 | |
| Hardness change | Point | 1,50 | 2,50 | 1,50 | 1,00 | Maks +8 |
| TS before aging | N/mm ² | 19,30 | 20,70 | 24,90 | 21,20 | Min 12 |
| TS after aging | N/mm ² | 26,80 | 25,10 | 23,90 | 23,90 | |
| TS change | % | 39,00 | 21,00 | -4,00 | 13,00 | ± 15 |
| EB before aging | % | 510,00 | 550,00 | 500,00 | 510,00 | Min 400 |
| EB after aging | % | 440,00 | 430,00 | 420,00 | 420,00 | |
| EB change | % | -14,00 | -22,00 | -16,00 | -18,00 | ± 25 |
| Tear strength | kN/m | 86,40 | 101,00 | 56,90 | 89,50 | Min 7 |
| Compression set | % | 24,10 | 24,63 | 19,34 | 20,59 | Maks 60 |
| Ozone resistance | | No Crack | No Crack | No Crack | No Crack | No Crack |

redaman karet tahan gempa sesuai dengan parameter pengujian yaitu frekuensi 10 Hz dan kecepatan tarik sesuai ISO 1827 adalah 5 mm/menit, regangan 30 persen, *cycle* lima kali (*conditioning*), dan satu kali (*test running*) (He et al., 2021) dapat dilihat pada Gambar 5.

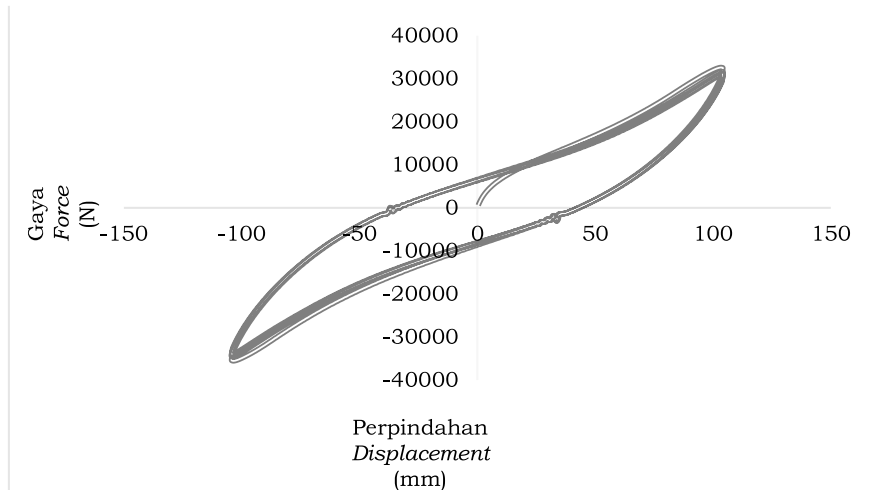
Dengan menggunakan persamaan (1) untuk menyelesaikan nilai rasio redaman karet dengan tipe AC1 sampai AC4 pada Tabel 3 dan Gambar 5 diperoleh nilai redaman karet tertinggi adalah AC4 yaitu sebesar 3 persen. Nilai rasio redaman pada karet murni AC4 dibandingkan dengan nilai rasio redaman karet peredam gempa yang



Gambar 5. Sifat redaman karet peredam gempa
 Figure 5. Damping properties of seismic rubber base isolator

sudah komposit menjadi alat peredam gempa yang sudah disusun dengan lapisan *multi-layer woven roving fiberglass* (Gambar 1), menghasilkan kurva histeretik seperti terlihat pada Gambar 6.

Dari Gambar 5 dan 6, serta persamaan (1), (2), dan (3) dihasilkan nilai rasio redaman sebesar 9 persen. Nilai rasio redaman 9 persen sangat cocok untuk diaplikasikan pada bangunan dengan beban



Gambar 6. Kurva histeretik karet peredam gempa (komposit)
Figure 6. Hysteretic curve of seismic rubber base isolator (composite)

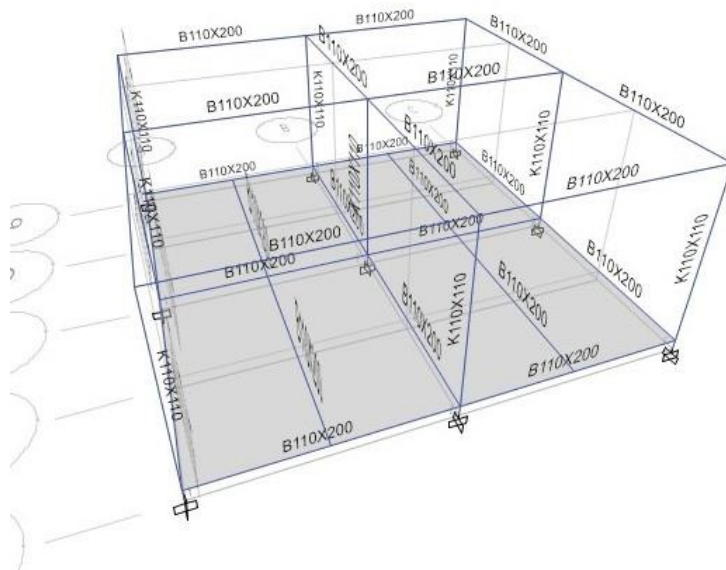
aksial rendah seperti bangunan rumah tinggal (Wijaya & Kusumawati, 2021).

Pengaplikasian karet peredam gempa pada rumah tinggal sederhana (Gambar 2) yang berlokasi di Jakarta menghasilkan waktu getar pada saat gempa sebesar 1,1 detik. Bila dibandingkan dengan kondisi saat belum diaplikasikan karet peredam gempa dimana peletakan tumpuan dasar adalah tumpuan jepit menghasilkan waktu getar sebesar 0,4 detik. Hal ini membuktikan bahwa aplikasi karet peredam gempa mampu memperpanjang waktu getar bangunan (Wijaya et al., 2019).

Aplikasi rumah tinggal sederhana tanpa alat peredam gempa dilakukan dengan simulasi analisis *non linier time history* menggunakan ETABS 18.1.0 pada

sebelas *ground motion* rekaman gempa antara lain: San Fernando, Corinth Greece, Loma Prieta, Landers Joshua Tree station, Landers Morongo Valley Fire station, Landers North Palm Springs Fire station, Chuetsu-oki Yoshikawaku station, Chuetsu-oki Nigh11 station, Iwate Kami Miyagi station, Iwate Yokote Masuda station, dan Iwate Yuzawa town station, menghasilkan *performance criteria* yaitu *life safety* dan *collapse prevention* yang artinya ketika terjadi gempa, maka bangunan akan rusak. Pemodelan bangunan rumah tinggal sederhana tanpa alat peredam gempa dapat dilihat pada Gambar 7.

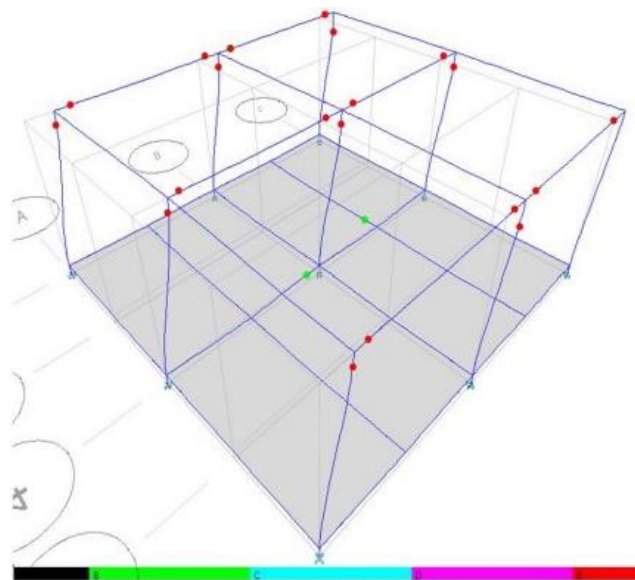
Dari sebelas *ground motion* yang disimulasikan, *ground motion* Corinth menghasilkan performa terburuk. Pada Gambar 8 terlihat bahwa *performance criteria* ketika terjadi gempa mengalami



Gambar 7. Pemodelan rumah tanpa karet peredam gempa
Figure 7. Modeling of a residential housing without seismic rubber base isolator

kerusakan pada elemen kolom dan balok, hal ini ditunjukkan melalui titik merah pada hampir semua elemen balok dan kolom. Level kerusakan masuk kategori kerusakan yang tidak dapat diperbaiki.

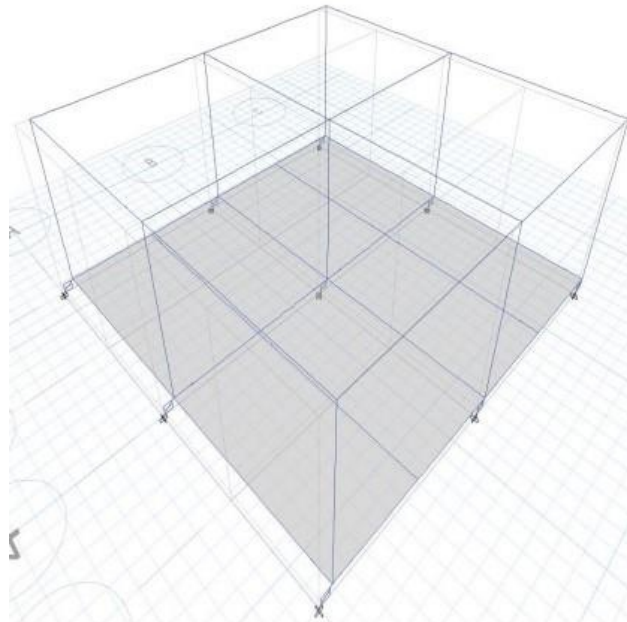
Pada simulasi studi bangunan rumah tinggal sederhana menggunakan karet peredam gempa, analisis *non linier time history* menunjukkan efektifitas penggunaan karet peredam gempa untuk mendisipasi



Gambar 8. Kerusakan struktur rumah tinggal tanpa karet peredam gempa
Figure 8. Damage to residential structures without seismic rubber base isolator

energi gempa. Input rasio redaman dari persamaan (1), (2), dan (3), kurva histeretik pada Gambar 6 dimodelkan dan menghasilkan perpanjangan periode getar bangunan yaitu sebesar 1,1 detik seperti terlihat pada Gambar 9.

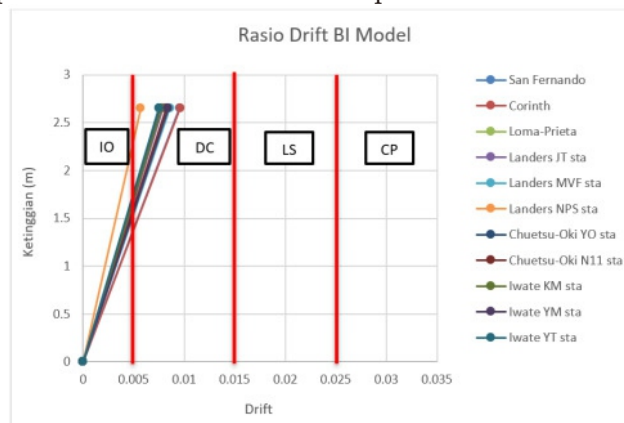
Dari kriteria performa bangunan dengan karet peredam gempa diperoleh hasil yang lebih baik secara signifikan. Pada model rumah tanpa karet peredam gempa didapat level kerusakan pada point E (Gambar 8), sedangkan pada model dengan



Gambar 9. Periode getar rumah tinggal sederhana menggunakan karet peredam gempa
 Figure 9. *Vibration period of a residential housing using seismic rubber base isolator*

menggunakan karet peredam gempa didapat level kerusakan B. *Maximum Drift Ratio* pada analisis *non linier time history* didapat pada *ground motion* Corinth, dimana diperoleh *Drift Ratio* yang termasuk dalam kriteria *Immediate Occupancy (IO) to Damage Control (DC)*. Grafik hasil analisis *drift* pada setiap level lantai disajikan pada Gambar 10.

Dari Gambar 810 terlihat bahwa rentang performa bangunan berada pada *IO* sampai *DC*, artinya pemasangan karet peredam gempa pada dasar bangunan mampu mendisipasi energi gempa, sehingga struktur atas rumah tinggal tidak mengalami deformasi. Pada level *IO* dipastikan tidak akan terjadi kerusakan



Gambar 10. *Drift ratio* rumah tinggal sederhana dengan karet peredam gempa
 Figure 10. *Drift ratio of a simple residential house with seismic rubber base isolator*

sama sekali, namun ketika performa mencapai level *DC* maka akan terjadi kerusakan minor non struktural yang perbaikannya bisa dilakukan dalam waktu satu hari dan tidak memakan biaya yang mahal.

Setelah dilakukan *3D* simulasi gempa *non linier time history* sebelas *ground motion* studi kasus rumah tinggal baik dengan karet peredam gempa maupun tanpa karet peredam gempa didapat bahwa karet peredam gempa buatan lokal mampu berperilaku selayaknya karet peredam gempa impor yang mahal harganya. Perilaku bangunan yang menggunakan karet alam sebagai peredam gempa memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan bangunan tanpa karet alat alam sebagai peredam gempa.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hampir setiap terjadi gempa bumi, selalu yang menjadi korban adalah rakyat kecil. Dimana bangunan rumah tinggal sederhana sering diabaikan dalam proses *engineering* dengan alasan biaya mahal jika dibangun dengan detail penulangan baja yang dihitung dengan pertimbangan daktilitas tinggi. Karet peredam gempa sesuai dengan fungsinya akan mampu meredam gempa, namun bagi rakyat kecil karet peredam gempa adalah barang mewah yang sangat mahal karena harus diimpor dari luar negeri. Belum adanya produksi lokal yang menyebabkan mahalnya harga karet peredam gempa. Dari hasil simulasi aplikasi karet peredam gempa pada rumah tinggal sederhana, karet peredam gempa buatan lokal mampu menaikkan kinerja struktur bangunan, memperpanjang periode getar ketika terjadi gempa, dan mengurangi kerusakan bangunan. Perilaku daktil yang diharapkan dicapai dengan penggunaan karet peredam gempa terealisasi dengan nilai rasio redaman sebesar 9 persen. Dengan hasil penelitian ini optimisme tinggi untuk kebangkitan produk lokal kedepannya dapat diwujudkan. Kekurangan dari penelitian ini adalah pengujian *prototype*

alat peredam gempa masih dilakukan secara numerik, dan simulasi aplikasi penggunaan karet peredam gempa pada bangunan rumah tinggal masih dilakukan dengan program komputer. Kedepannya diharapkan hasil simulasi numerik ini dapat dibuktikan dengan pengujian secara skala penuh.

KONTRIBUSI PENULIS

Rancangan penelitian, analisis numerik, interpretasi hasil pengujian, dan penulisan naskah publikasi dilakukan oleh Usman Wijaya, pembuatan *prototype woven roving fiberglass* dilakukan oleh Rachmansyah, pembuatan kompon dan pengujian sampel karet dilakukan oleh tim Adi Cifriadi, Santi Puspitasari, dan Asron Falaah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Direktorat Sumber Daya atas bantuan hibah penelitian dengan nomor kontrak 028/E4.1/AK.04.PRN/2021. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada seluruh pihak yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- BS-EN 15129. (2009). Anti Seismic Devices.
- Calabrese, A., Losanno, D., Spizzuoco, M., Strano, S., & Terzo, M. (2019). Recycled rubber fiber reinforced bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: The demonstration building of Pasir Badak, Indonesia. *Engineering Structures*, 192, 1 2 6 – 1 4 4 . <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.076>

- He, H., Zhang, Q., Zhang, Y., Chen, J., Zhang, L., & Li, F. (2021). A comparative study of 85 hyperelastic constitutive models for both unfilled rubber and highly filled rubber nanocomposite material. *Nano Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.003>
- Kelly, J. M., & Calabrese, A. (2012). Pacific earthquake engineering mechanics of fiber reinforced bearings.
- Koupai, S., Bakhshi, A., & Tabrizi, V. V. (2017). Experimental investigation on effects of elastomer components on dynamic and mechanical properties in seismic isolator compounds. *Construction and Building Materials*, 135, 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.184>
- NEHRP FEMA-451B. (2006). NEHRP recommended provisions: instructional materials (FEMA 451B). Notes, 1–27.
- Sierra, I. E., Losanno, D., Strano, S., Marulanda, J., & Thomson, P. (2019). Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings. *Engineering Structures*, 183, 894–906. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.037>
- Tavio, & Wijaya, U. (2020). Experimental study of Indonesian low-cost glass fiber reinforced elastomeric isolators (GFREI). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(1), 311–317. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.1.8054>
- Tsiavos, A., Haladij, P., Sextos, A., & Alexander, N. A. (2020). Analytical investigation of the effect of a deformable sliding layer on the dynamic response of seismically isolated structures. *Structures*, 27, 2426–2436. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.016>
- Wijaya, U., Soegiarso, R., & Tavio. (2019). Seismic performance evaluation of a base-isolated building. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(1), 285–296.
- Wijaya, U., & Kusumawati, E. (2021). Experimental study of two stages on the use of local rubber as base isolator for dwelling houses. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 132, 534–542. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6311-3_62
- Yang, X., Su, H., Liu, L., & Lei, Y. (2020). Identification of the nonlinear characteristics of rubber bearings in model-free base-isolated buildings using partial measurements of seismic responses. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 39(3), 690–703. <https://doi.org/10.1177/1461348419843385>