



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



KERUSAKAN UNTUK MENCAPAI KETANGGUHAN

**Strategi Perancangan Struktur Baja
Tahan Gempa**

Profesor R. Muslinang Moestopo

**Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
21 Juni 2025**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

KERUSAKAN
UNTUK MENCAPAI KETANGGUHAN:
Strategi Perancangan Struktur Baja
Tahan Gempa

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

KERUSAKAN
UNTUK MENCAPAI KETANGGUHAN:
Strategi Perancangan Struktur Baja
Tahan Gempa

Prof. R. Muslinang Moestopo

21 Juni 2025
Aula Barat ITB

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Kerusakan untuk Mencapai Ketangguhan:

Strategi Perancangan Struktur Baja Tahan Gempa

Penulis : Prof. R. Muslinang Moestopo

Reviewer : Prof. Iswandi Imran

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-729-7

e-ISBN : 978-623-297-728-0 (PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**"Jikalau bukan Tuhan yang membangun rumah,
sia-sialah usaha orang yang membangunnya ..."**

Mazmur 127:1

PRAKATA

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kasih yang atas berkat dan kemurahan-Nya memberi amanah kepada saya sebagai Guru Besar Institut Teknologi Bandung dalam bidang struktur baja tahan gempa, sebuah bidang kajian yang hingga awal tahun 2000 belum banyak mendapat perhatian dalam mendukung pembangunan struktur gedung di sebagian besar wilayah Indonesia yang rawan gempa.

Buku ini memaparkan sebuah strategi perancangan struktur bangunan baja yang mengandalkan kemampuan elemen struktur baja mendisipasi energi dalam bentuk kerusakan yang terkendali terhadap bahaya gempa yang besar dan yang waktu kejadiannya tidak dapat ditentukan dengan pasti. Strategi ini mendasari berbagai penelitian yang selama ini saya lakukan dalam rangka mengembangkan struktur bangunan yang tangguh, *resilient* dan *sustainable*.

Saya sangat bersyukur atas kesempatan menulis buku orasi ilmiah ini, dan berharap buku ini dapat memberi pemahaman kepada para pembaca tentang mekanisme ketangguhan struktur baja terhadap bahaya gempa, serta mendorong agar perancangan dan pelaksanaan konstruksi baja tahan gempa di Indonesia dilakukan dengan benar sesuai dengan ketentuan perancangan struktur bangunan tahan gempa yang berlaku.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada berbagai pihak yang telah berperan secara langsung maupun tidak langsung dalam penyiapan buku orasi ini.

Bandung, 21 Juni 2025

Muslinang Moestopo

SINOPSIS

Struktur bangunan yang dibangun di daerah rawan gempa, seperti di sejumlah besar wilayah Indonesia, harus mampu bertahan terhadap bahaya gempa besar. Saat ini, perkembangan pengetahuan tentang rekayasa kegempaan telah dapat memprediksi kemungkinan terjadinya gempa di suatu lokasi dengan tingkat gaya gempa tertentu, antara lain melalui Peta Sumber dan Bahaya Gempa yang telah disusun berdasarkan kondisi geologi dan riwayat kegempaan, termasuk catatan sumber gempa, kekuatan, dan jaraknya ke lokasi di permukaan tanah. Selanjutnya, telah dapat dibuat spektrum respons percepatan gempa yang akan dialami struktur bangunan di suatu lokasi dengan kondisi tanah tertentu (keras, sedang, atau lunak), yang akan digunakan untuk menentukan besarnya gaya gempa rencana bagi struktur yang akan dibangun. Namun demikian, perancangan struktur tahan gempa yang dilakukan berdasarkan kekuatan struktur memikul gaya akibat gempa tanpa mengalami leleh, akan menghasilkan dimensi struktur yang besar dan kurang realistis, apalagi masih sangat mungkin terjadi gempa dengan kekuatan melebihi besarnya gempa rencana. Perancangan struktur tahan gempa yang dilakukan berdasarkan kemampuan mendisipasi energi gempa telah dikembangkan dan menghasilkan struktur dengan dimensi relatif lebih kecil dilengkapi dengan elemen struktur tertentu (sekering) yang akan leleh (rusak) secara terkendali selama gempa besar tanpa terjadi keruntuhan struktur.

Perancangan struktur baja berdasarkan kerusakan elemen sekering dapat dilakukan dengan memenuhi persyaratan antara lain: material mampu berdeformasi inelastis cukup besar dengan peningkatan tegangan yang cukup signifikan, penampang dan elemen baja cukup kompak dan tidak mengalami tekuk, dan integrasi yang baik di antara seluruh elemen struktur dengan sistem sambungan yang kuat. Sifat material baja yang daktail dimanfaatkan untuk mengembangkan berbagai sistem struktur baja pemikul gempa dengan berbagai jenis elemen sekering, yang kinerjanya direpresentasikan dengan nilai besaran parameter seismik struktur yang berbeda. Sejumlah sistem struktur baja dan sistem sambungan pemikul gempa telah dipublikasikan dalam ketentuan Standar Nasional Indonesia saat ini, dan diperkirakan akan bertambah jenis dan jumlahnya sejalan dengan perkembangan penelitian

tentang sistem struktur baja pemikul gempa yang secara intensif dilakukan di berbagai negara.

Sejalan dengan tuntutan yang berkembang tentang struktur bangunan yang tangguh, *resilient* dan *sustainable*, terutama untuk bangunan di daerah yang sering mengalami gempa dengan intensitas tinggi, telah berkembang pula perancangan elemen sekering maupun sistem sambungan yang dapat diganti pada sistem struktur baja pemikul gempa. Hal ini dimungkinkan karena kerusakan direncanakan hanya terjadi secara terpusat di elemen yang mudah diganti, baik berupa elemen link maupun elemen pada sistem sambungan. Hal lain yang telah berkembang adalah sistem struktur yang dengan mekanisme *self-centering*, dengan merancang posisi struktur setelah mengalami gempa secara keseluruhan kembali ke posisi sebelum mengalami gempa, walaupun akan mengalami kerusakan (leleh) dalam mendisipasi energi selama gempa berlangsung.

Dengan telah berkembangnya konsep, metode dan dukungan komputasi untuk mengevaluasi kerusakan struktur bangunan eksisting dan menentukan target kinerja struktur terhadap bahaya gempa, maka penggunaan elemen sekering yang terbuat dari bahan baja yang daktail dimanfaatkan pula untuk melakukan perbaikan (*retrofitting*) maupun peningkatan kinerja pada struktur bangunan yang telah berdiri, baik struktur baja maupun beton bertulang, dalam menghadapi bahaya gempa besar di masa mendatang. Hal ini akan menghasilkan struktur bangunan yang tangguh dengan usia layan yang bertambah.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	VII
SINOPSIS	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XVII
DAFTAR SIMBOL.....	XIX
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Indonesia Rawan Gempa	1
1.2 Perancangan Berdasarkan Kekuatan Struktur	2
2 STRATEGI PERANCANGAN STRUKTUR GEDUNG TAHAN GEMPA ...	7
2.1 Daktilitas	11
2.2 Kuat Lebih	13
2.3 Beban Gempa Rencana.....	14
3 PERANCANGAN KERUSAKAN UNTUK MENCAPAI KETANGGUHAN.....	19
3.1 Konsep Perancangan.....	19
3.2 Sistem Struktur Baja Tahan Gempa	20
4 PERANCANGAN STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA	23
4.1 Spesifikasi Bahan Baja	24
4.2 Stabilitas.....	24
4.3 Daktilitas	28
4.4 Kuat Lebih dan Desain Kapasitas.....	29
4.5 Sistem Sambungan	30
5 SISTEM STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA	35
5.1 Sistem Rangka Pemikul Momen	35
5.2 Sistem Rangka Berpengaku Eksentris	38
5.3 Sistem Struktur Tahan Gempa Lainnya.....	41
6 PENGEMBANGAN LANJUT STRUKTUR BAJA PEMIKUL GEMPA	47
6.1 PERANCANGAN DAN EVALUASI STRUKTUR BERBASIS KINERJA.....	47
6.2 <i>RESILIENT AND SUSTAINABLE STRUCTURES</i>	49
6.3 AGENDA KK REKAYASA STRUKTUR FTSL ITB	54
PENUTUP	57
UCAPAN TERIMA KASIH	59

DAFTAR PUSTAKA.....	61
CURRICULUM VITAE.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Catatan kejadian gempa bumi di Indonesia [1]	1
Gambar 2	Spektrum respons perpindahan, kecepatan, dan percepatan [3].....	3
Gambar 3	Peta spektrum respons 0,2 detik (atas) dan 1 detik (bawah) MCE_R (redaman 5% - kelas situs tanah SB) [1].....	4
Gambar 4	Spektrum respons percepatan desain akibat gempa [4]	5
Gambar 5	Spektrum respons percepatan di kota Jakarta dan Padang sesuai kategori situs tanah keras (SC), sedang (SD), dan lunak (SE) [5].....	5
Gambar 6	Strategi perancangan struktur tahan gempa (a) sendi plastis pada balok, (b) <i>base isolator</i> , (c) <i>dampers</i> [8]	8
Gambar 7	Disipasi energi akibat gempa melalui pelelehan elemen struktur atas (balok lantai) [9]	8
Gambar 8	Contoh kurva histeresis rangka baja pemikul momen [10].....	8
Gambar 9	<i>Base isolator</i> pada bangunan tinggi (a) posisi di bangunan, (b) disipasi energi akibat gempa, (c) beberapa jenis <i>base isolator</i> (dari kiri: <i>natural rubber bearing</i> , <i>elastomeric bearing</i> , <i>lead rubber bearing</i>) [11]	9
Gambar 10	Kurva histeresis struktur dengan <i>base isolator</i> [12]	9
Gambar 11	<i>Single concave friction pendulum</i> (a) kondisi diam, (b) kondisi bergerak, (c) diagram gaya, (d) kurva histeresis gaya-perpindahan [13].....	10
Gambar 12	Disipasi energi akibat gempa melalui elemen redaman (Sumber: https://theconstructor.org/earthquake/seismic-dampers/8332/).....	10
Gambar 13	Kurva histeresis struktur dengan <i>dampers</i> [14].....	11
Gambar 14	Batang Ditarik: (a) perpanjangan pada batang, (b) kurva P vs Δ	12
Gambar 15	Hasil Uji Tarik untuk berbagai mutu baja [15]	13
Gambar 16	Respons Struktur Pada Pembebanan Inelastik [16]	14
Gambar 17	Spektrum respons desain elastik dan inelastik	15
Gambar 18	Parameter desain seismik.....	15

Gambar 19	Kurva histeresis elemen sekering	17
Gambar 20	Hubungan <i>detailing</i> dengan besarnya beban gempa rencana untuk sistem struktur pemikul gempa.....	18
Gambar 21	Tekuk pada pelat penampang [19].....	25
Gambar 22	Tekuk pada elemen [19]	25
Gambar 23	Pengaruh kelangsingan terhadap daktilitas [19]	27
Gambar 24	Tekuk torsi lateral pada balok.....	28
Gambar 25	Kerusakan struktur bangunan (a) <i>soft story</i> dan (b) <i>beam sway</i>	30
Gambar 26	Perancangan elemen sekering dan elemen non-sekering: kuat perlu (R_u) $\leq$ kuat rencana (ϕR_n) $\leq$ kapasitas elemen	30
Gambar 27	Kinerja sambungan balok-kolom [21], (a) <i>Welded</i> , (b) <i>End-plate</i> , (c) <i>Angle-cleat</i>	31
Gambar 28	Tipe sambungan terprakualifikasi (1) penampang balok tereduksi, (2) pelat ujung diperpanjang berbaut dan tanpa pengaku, (3) pelat ujung diperpanjang berbaut dengan pengaku, (4) pelat sayap berbaut, (5) sayap dilas tanpa penguat badan dilas, (6) braket Kaiser berbaut, (7) sambungan momen Contech Conxl, (8) sambungan momen <i>sideplate</i> , (9) sambungan momen <i>Simpson strong-tie strong frame</i> , (10) sambungan momen T-ganda [22]	32
Gambar 29	Perancangan struktur baja pemikul gempa dengan kerusakan pada elemen sekering	33
Gambar 30	Sistem rangka pemikul momen khusus (<i>special moment frame</i>) [19]	35
Gambar 31	Sendi plastis akibat beban lateral (a) bidang momen, (b) posisi sendi plastis, (c) sendi plastis, (d) kurva histeresis) [19]	36
Gambar 32	Sistem rangka berpengaku eksentris (<i>eccentrically braced frame</i>) [19]	38
Gambar 33	Deformasi dan gaya-gaya dalam pada sistem rangka berpengaku eksentris akibat beban lateral	38
Gambar 34	Tegangan pada struktur SRBE akibat beban lateral [25]	39

Gambar 35	Perilaku elemen link sebagai pendisipasi energi pada struktur: (a) kerusakan pada link, (b) distribusi tegangan, (c) kurva histeresis [26]	40
Gambar 36	Sistem rangka berpengaku konsentris [19] dan [27], (a) sistem struktur, (b) deformasi struktur, (c) kurva histeresis	42
Gambar 37	Sistem rangka berpengaku tahan tekuk [19, 27], (a) sistem struktur, (b) elemen sekering, (c) kurva histeresis	43
Gambar 38	Sistem dinding geser pelat khusus [19]	44
Gambar 39	Pemodelan elemen tarik dan disipasi energi pada SPSW (a) elemen tarik (b) kurva histeresis [19, 27]	44
Gambar 40	Kerusakan pada sistem dinding geser pelat khusus akibat beban siklik (a) sebelum pembebanan, (b) setelah pembebanan [28]	45
Gambar 41	Kondisi kerusakan struktur dan tingkat kinerja yang diinginkan [32]	48
Gambar 42	Evaluasi kinerja struktur akibat pembebanan gempa [33]	48
Gambar 43	Matriks Perancangan Struktur Berbasis Kinerja [34]	49
Gambar 44	Pengujian link yang dapat diganti pada struktur <i>core</i> bangunan tinggi [35, 37]	50
Gambar 45	Sistem sambungan yang dapat diganti dengan mekanisme kuncian [41]	51
Gambar 46	Hasil kajian numerik beban siklik pada sistem sambungan dengan kuncian (<i>interlock</i>) [41]	51
Gambar 47	Sistem struktur dengan mekanisme <i>self-centering</i> [44, 45]	53
Gambar 48	Alat pelepas energi gempa [47]	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk sistem pemikul gaya seismik [4]	16
Tabel 2	Faktor keutamaan gempa [4]	16
Tabel 3	Perancangan elemen struktur pemikul gempa	19
Tabel 4	Beberapa sistem struktur baja pemikul gempa	21
Tabel 5	Nilai parameter untuk sistem strukur baja pemikul gaya gempa [4]	22
Tabel 6	Batas penggunaan sistem struktur baja berdasarkan KDS [4]	24
Tabel 7	Contoh batasan rasio lebar terhadap tebal penampang untuk beberapa elemen struktur tahan gempa [18]	26
Tabel 8	Nilai R_y dan R_t untuk Material Baja [17]	29
Tabel 9	Batasan besarnya sudut rotasi rencana link [17]	41

DAFTAR SIMBOL

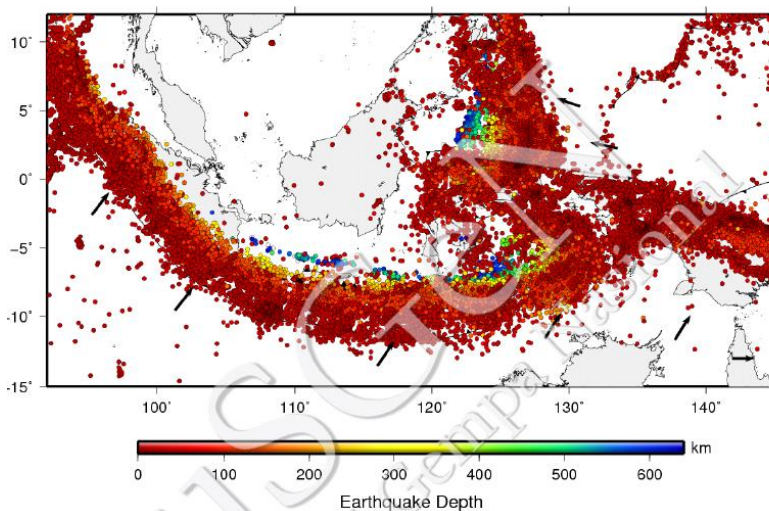
A_w	=	luas penampang pelat badan, mm ²
C_d	=	faktor pembesaran defleksi
C_{pr}	=	faktor untuk memperkirakan kekuatan puncak sambungan, termasuk pengerasan regangan, pengekangan lokal, penguatan/penulangan tambahan, dan kondisi-kondisi sambungan lainnya
C_s	=	respons percepatan struktur yang direncanakan (dinyatakan dalam percepatan gravitasi, g), yang ditentukan dengan menggunakan spektrum respons percepatan
E	=	modulus elastisitas baja, MPa
F_y	=	kuat leleh baja, MPa
I_e	=	faktor keutamaan gempa
M_{pr}	=	kapasitas momen penampang terekspektasi, kNm
R	=	faktor modifikasi respons
R_y	=	rasio kekuatan leleh terekspektasi terhadap kekuatan leleh minimum terspesifikasi
S_{DS}	=	parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek
T	=	periode alami struktur, detik
V	=	gaya gempa dasar yang akan dialami oleh struktur
W	=	berat seismik bangunan, kN
Z_e	=	modulus plastis penampang, mm ⁴
k	=	kekakuan struktur dalam arah gempa yang ditinjau
λ_{hd}	=	batasan rasio lebar terhadap tebal komponen struktur daktail tinggi
λ_{md}	=	batasan rasio lebar terhadap tebal komponen struktur daktail sedang
M	=	massa bangunan, kg
Ω_0	=	faktor kuat lebih sistem
r_y	=	jari-jari girasi terhadap sumbu lemah penampang, mm
$\Sigma^* M_{pc}$	=	jumlah proyeksi kuat lentur kolom pada pertemuan sumbu balok-kolom, kNm
$\Sigma^* M_{pb}$	=	jumlah proyeksi kuat lentur balok pada pertemuan sumbu balok-kolom, kNm

1 PENDAHULUAN

1.1 Indonesia Rawan Gempa

Kejadian gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang harus diwaspadai karena seringkali mengakibatkan kerusakan dan kehancuran bangunan infrastruktur, bahkan korban jiwa. Sebagian besar wilayah Indonesia merupakan daerah rawan gempa mengingat wilayah Indonesia merupakan pertemuan beberapa lempeng bumi yang aktif bertumbukan satu dengan lainnya dan mengakibatkan seringnya terjadi pelepasan energi di bawah permukaan bumi yang menimbulkan gempa yang dahsyat di permukaan bumi.

Gambar 1 menunjukkan bahwa dalam kurun lebih dari 100 tahun terakhir tercatat ribuan kali kejadian gempa berkekuatan di atas M5 di wilayah Indonesia [1], di mana beberapa di antaranya menyebabkan kerusakan yang dahsyat dan korban jiwa yang cukup banyak. Para ahli memprediksi akan sering terjadi gempa yang berulang dalam periode tertentu dengan kekuatan tertentu, namun tidak dapat ditentukan dengan tepat waktu terjadinya. Berdasarkan sejarah terjadinya gempa yang tercatat selama ratusan tahun, dan dengan mempelajari pergerakan lempeng bumi di wilayah yang terdampak, dapat diperkirakan terjadinya gempa-gempa besar yang dapat berulang di wilayah terdampak bahaya gempa.



Gambar 1 Catatan kejadian gempa bumi di Indonesia [1]

Sejalan dengan perkembangan ilmu tentang kegempaan dan statistik probabilistik, serta kemampuan komputasi yang meningkat, gempa yang diperhitungkan akan terjadi berulang dalam kurun tertentu (50, 100, 500, 1000, 2500 tahun) di suatu wilayah dapat diperkirakan tingkat kekuatannya dalam besaran percepatan gempa, untuk selanjutnya dijadikan dasar merancang kekuatan elemen struktur bangunan tahan gempa.

1.2 Perancangan Berdasarkan Kekuatan Struktur

Perancangan struktur bangunan ditujukan untuk menghasilkan struktur yang mampu bertahan terhadap gangguan atau beban luar dalam berbagai bentuk, yang secara singkat dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Kapasitas} > \text{Kebutuhan} \quad (1)$$

Kebutuhan dirumuskan dengan berbagai gangguan atau beban yang diperhitungkan akan terjadi selama umur bangunan, sedangkan kapasitas dirumuskan berdasarkan sifat, mekanika bahan, dan perilaku sistem struktur yang dirancang.

Pada awal perkembangannya, perancangan struktur tahan gempa dilakukan berdasarkan analisis struktur terhadap beban lateral statik yang dianggap merepresentasikan bahaya gempa yang diperkirakan akan dialami struktur bangunan selama usia layannya. Berbagai upaya dilakukan untuk merumuskan besarnya beban gempa yang akan dibebankan pada struktur yang akan dibangun di berbagai lokasi dengan kondisi geologi dan lapisan tanah yang berbeda. Data mengenai kondisi geologi dan catatan gempa yang telah terjadi di berbagai lokasi di seluruh dunia (berupa data percepatan gempa di permukaan tanah) menjadi masukan penting dalam mempelajari karakteristik dari sumber gempa yang diperkirakan akan tetap aktif di masa mendatang. Selain itu kemungkinan terjadinya gempa di suatu lokasi dan risiko yang diakibatkannya, perlu dipelajari dengan saksama.

Newmark dan Hall [2] melakukan kajian komprehensif terhadap sejumlah besar data riwayat gempa yang pernah terjadi di seluruh dunia, dan menemukan pola respons struktur tertentu terhadap percepatan tanah akibat gempa, yang kemudian lebih dikenal dengan spektrum respons (*response spectra*), yang menggambarkan besarnya perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang diperkirakan akan dialami oleh struktur bangunan dengan

karakteristik tertentu di suatu lokasi sebagai respons terhadap percepatan gerakan gempa (*peak ground acceleration*, PGA) yang diperkirakan akan terjadi di permukaan tanah di lokasi tersebut dengan kondisi tanah tertentu (lunak, sedang, atau keras). Karakteristik struktur direpresentasikan melalui besaran parameter periode alami struktur yang besarnya ditentukan oleh kekakuan struktur dan massa bangunan.

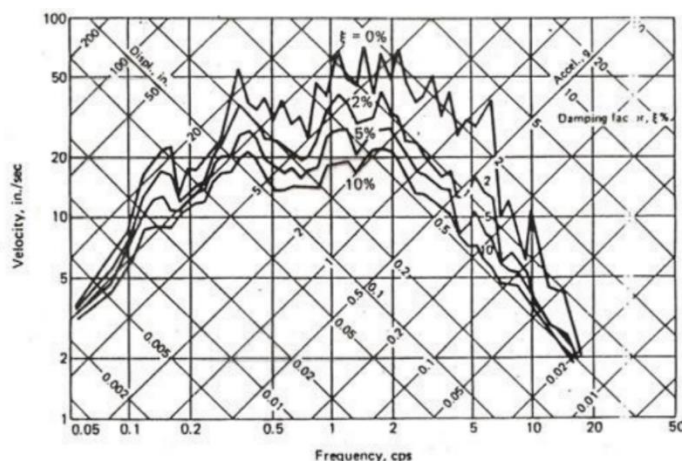
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

di mana T : periode alami struktur (detik)

m : massa bangunan (kg)

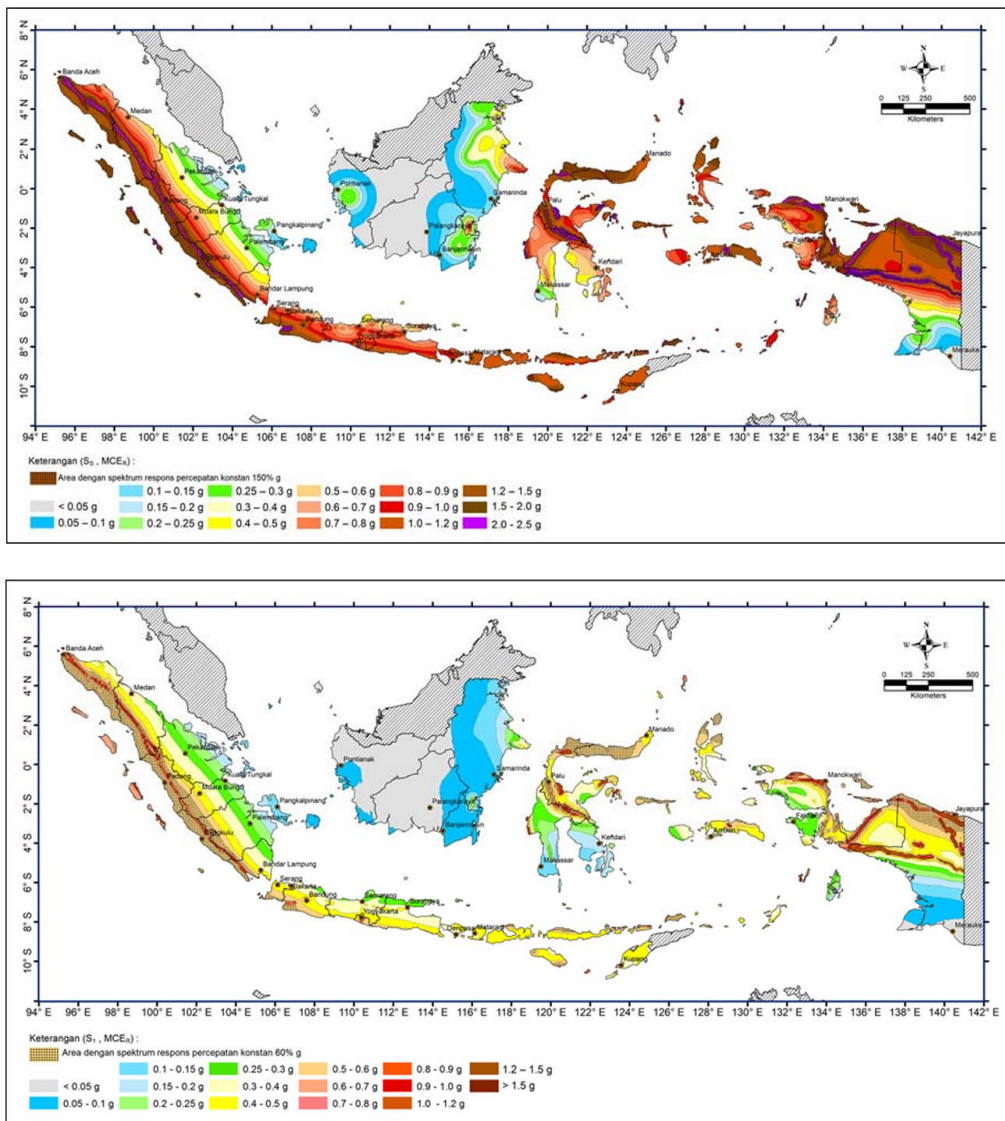
k : kekakuan struktur dalam arah gempa yang ditinjau (N/mm)

Spektrum respons perpindahan, kecepatan, dan percepatan ditunjukkan pada **Gambar 2**, yang bentuknya telah sangat dikenal di seluruh dunia.



Gambar 2 Spektrum respons perpindahan, kecepatan, dan percepatan [3]

Spektrum respons percepatan untuk setiap lokasi dapat dibuat dengan menggunakan nilai parameter kegempaan yang telah disusun dalam Peta Gempa. Pusat Gempa Nasional telah berhasil menyusun Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 [1] , yang antara lain menggambarkan besarnya parameter yang terkait dengan percepatan gempa di batuan dasar yang diperhitungkan di lokasi tertentu (S_s dan S_i) dengan koordinat Lintang dan Bujur di seluruh wilayah Indonesia (**Gambar 3**).

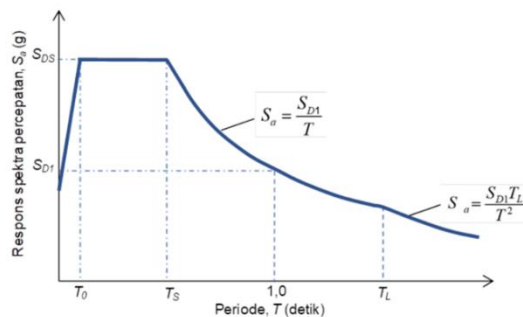


Gambar 3 Peta spektrum respons 0,2 detik (atas) dan 1 detik (bawah) MCE_R (redaman 5% - kelas situs tanah SB) [1]

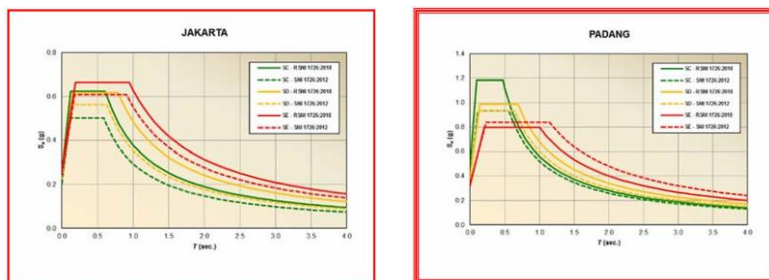
Besarnya respons percepatan spektral pada periode pendek, S_s dan pada periode 1 detik, S_1 [4] di seluruh wilayah Indonesia tersebut dirumuskan dengan menggunakan ribuan data sumber gempa yang tercatat di Indonesia dan dengan mempertimbangkan kondisi geologi/batuan dan jarak dari lokasi ke berbagai sumber gempa. Nilai parameter ini diperhitungkan terhadap 2% kemungkinan terlampauinya gempa terbesar yang diperkirakan terjadi (*Risk Targeted Maximum Considered Earthquake*, MCE_R) dengan periode ulang 2475

tahun untuk redaman struktur 5%, atau setara dengan tingkat keandalan struktur sebesar 98% dalam 50 tahun masa layan bangunan.

Selanjutnya, dengan menggunakan nilai S_s dan S_1 di suatu lokasi dan dengan memperhitungkan kondisi lapisan tanah di bawahnya (tanah lunak, sedang, atau keras), dapat ditentukan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang digunakan untuk membuat **spektrum respons percepatan desain** di permukaan tanah di lokasi didirikannya bangunan (**Gambar 4**). Sebagai contoh, **Gambar 5** menunjukkan spektrum respons untuk beberapa kondisi tanah di lokasi Jakarta dan Padang.



Gambar 4 Spektrum respons percepatan desain akibat gempa [4]



Gambar 5 Spektrum respons percepatan di kota Jakarta dan Padang sesuai kategori situs tanah keras (SC), sedang (SD), dan lunak (SE) [5]

Secara umum, terhadap gempa yang bekerja dalam arah horizontal, struktur dengan kekakuan lateral yang besar cenderung memiliki periode alami yang kecil. Struktur bangunan tinggi umumnya memiliki periode alami yang lebih besar. **Gambar 4** menunjukkan bahwa pada struktur bangunan rendah dengan periode alami yang kecil, peningkatan kekakuan lateral struktur akan cenderung menurunkan respons percepatan struktur. Sebaliknya untuk gedung tinggi, peningkatan kekakuan lateral struktur cenderung akan meningkatkan respons percepatan struktur akibat gempa.

Dengan mengingat Hukum Newton II ($\text{Gaya} = \text{massa} \times \text{percepatan}$), maka struktur akan mengalami gaya gempa dasar yang besarnya ditentukan oleh respons percepatan struktur terhadap gempa yang dialaminya. **Gambar 4** yang dibentuk dari **Gambar 2** pada sumbu percepatan, menunjukkan spektrum respons percepatan yang digunakan dalam perancangan struktur tahan gempa.

Adapun gaya akibat gempa yang akan dialami struktur bangunan (V) dapat dirumuskan sebagai:

$$V = W \times C_s \quad (3)$$

di mana V : gaya gempa dasar yang akan dialami oleh struktur, kN

W : berat seismik bangunan

C_s : respons percepatan struktur yang direncanakan (dinyatakan dalam percepatan gravitasi, g), yang ditentukan dengan menggunakan spektrum respons percepatan

Pada awalnya, desain struktur untuk bangunan bertingkat tahan gempa disusun berdasarkan kekuatan struktur dan elemen-elemennya dalam memikul gaya akibat gempa berupa beban statik ekuivalen, dengan mengasumsikan gaya akibat gempa terdistribusi linier pada tiap lantai. Dengan berkembangnya kemampuan komputasi dengan bantuan komputer, kekuatan struktur dirancang berdasarkan distribusi gaya akibat gempa pada tiap lantai yang besarnya ditentukan berdasarkan analisis ragam getar struktur dengan memperhatikan kekakuan dan massa setiap lantai serta redaman struktur. Selanjutnya, dengan analisis riwayat waktu berdasarkan input catatan gempa, dapat ditentukan gaya-dalam elemen-elemen struktur akibat gempa tertentu.

Sampai pada tahap ini, penilaian kinerja struktur dan perancangan struktur masih dilakukan berdasarkan besarnya kekuatan elastik struktur yang diperlukan untuk memikul besarnya gaya akibat gempa yang akan terjadi tanpa mengizinkan elemen struktur mengalami leleh, yang berarti belum memanfaatkan seluruh kemampuan struktur dalam memikul beban akibat gempa.

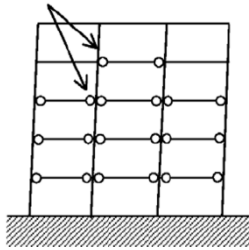
2 STRATEGI PERANCANGAN STRUKTUR GEDUNG TAHAN GEMPA

Struktur harus dirancang mampu bertahan terhadap bahaya gempa yang tidak dapat ditentukan dengan pasti besar dan waktu terjadinya. Namun untuk membangun struktur berdasarkan kekuatan elastik (untuk mampu bertahan tetap elastik dengan tegangan yang timbul tidak melampaui tegangan leleh elemen struktur) terhadap kemungkinan akan terjadinya gempa besar (terutama di daerah yang terkonfirmasi rawan gempa), menjadi kurang menarik secara ekonomis bahkan tidak realistis, karena akan menghasilkan dimensi dan kebutuhan kekuatan elemen-elemen struktur yang sangat besar, dengan probabilitas yang kecil akan terjadinya pembebanan gempa yang besar.

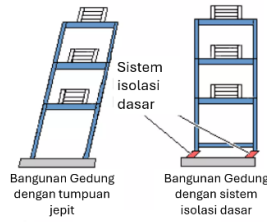
Konsep perancangan struktur tahan gempa yang telah berkembang saat ini tidak mengizinkan kerusakan non-struktural akibat gempa ringan, namun mengizinkan terjadinya kerusakan pada elemen non-struktural akibat gempa sedang, dan mengizinkan kerusakan elemen struktural akibat gempa besar tanpa mengakibatkan keruntuhan struktur bangunan.

Studi yang dilakukan oleh Housner [6] dan dilanjutkan oleh Veletsos dan Newmark [7] mengenai perilaku inelastik sistem struktur dan pengaruh redaman (*damping*) pada sistem struktur akibat gempa, membuka pemahaman baru yang terus berkembang tentang kemampuan struktur menghadapi bahaya gempa melalui disipasi energi baik melalui redaman maupun deformasi bolak-balik pada saat elemen struktur sudah mengalami kondisi inelastik. Upaya yang berkembang selanjutnya dalam menghadapi bahaya gempa adalah **mengendalikan energi yang timbul akibat peristiwa gempa** sedemikian rupa sehingga tidak mengakibatkan kerugian atau paling tidak meminimalkan bahaya bagi penghuni bangunan maupun bangunan. Hal ini berbeda dan dianggap **lebih realistis** dibandingkan dengan pemahaman yang berkembang sebelumnya di mana ketahanan struktur bangunan terhadap gempa diukur dan dirancang **hanya berdasarkan kekuatan struktur** untuk memikul gaya-gaya dalam yang diterima elemen-elemen struktur akibat bekerjanya gaya akibat gempa. Dalam mengendalikan energi akibat gempa, saat ini telah berkembang tiga strategi merancang struktur bangunan gedung seperti yang terlihat pada **Gambar 6**.

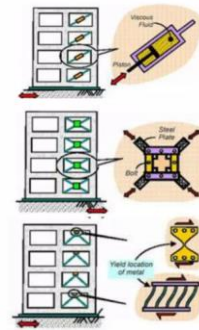
Disipasi energi gempa diharapkan terjadi pada ujung-ujung balok



(a)



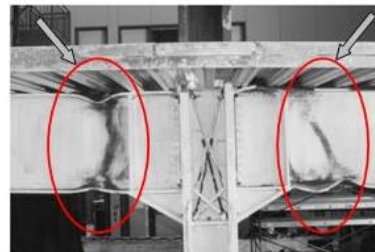
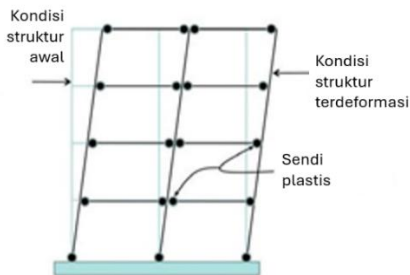
(b)



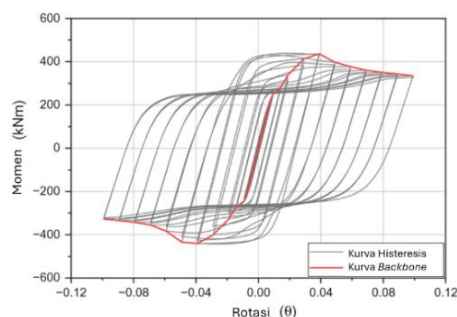
(c)

Gambar 6 Strategi perancangan struktur tahan gempa (a) sendi plastis pada balok, (b) *base isolator*, (c) *dampers* [8]

- 1) Pengendalian energi akibat gempa yang masuk ke dalam struktur bangunan dilakukan dengan merancang bagian-bagian elemen struktur tertentu mengalami leleh dan berdeformasi inelastik cukup besar (selanjutnya lebih dikenal dengan elemen sekering atau *fuse* yang leleh sebagai sendi plastis), sehingga selama goyangan bolak-balik akibat gempa, akan terjadi penyerapan atau disipasi energi yang dapat digambarkan melalui kurva histeresis (**Gambar 7 dan 8**).

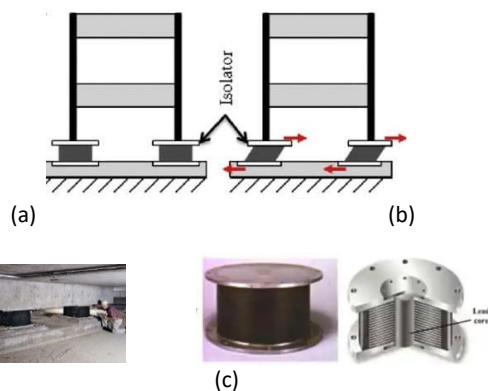


Gambar 7 Disipasi energi akibat gempa melalui pelelehan elemen struktur atas (balok lantai) [9]

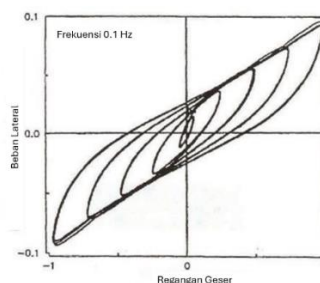


Gambar 8 Contoh kurva histeresis rangka baja pemikul momen [10]

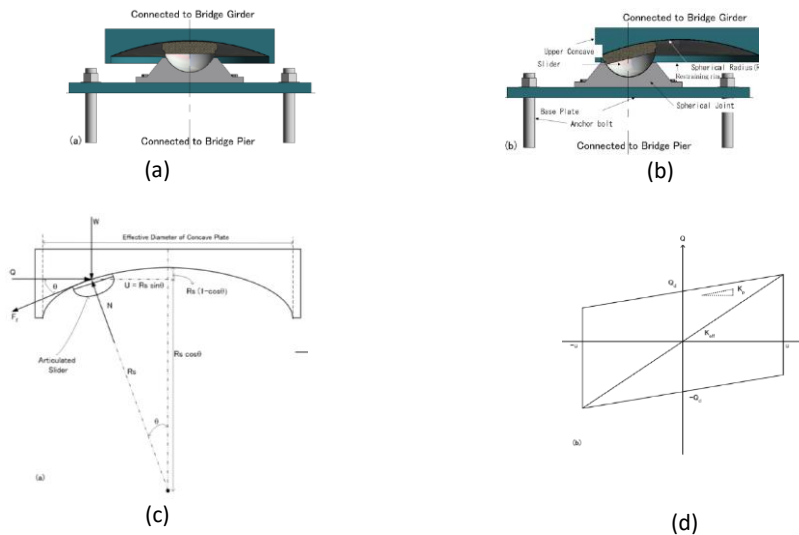
- 2) Pengendalian akibat gempa dengan memasang *base isolator* untuk mengurangi besarnya goyangan yang dialami struktur di atasnya. (**Gambar 9**). Energi akibat gempa diredam melalui deformasi inelastik siklik pada *base isolator*, sehingga tidak menimbulkan goyangan yang besar maupun kerusakan pada struktur di atasnya. *Base isolator* telah dikembangkan antara lain berupa sistem *sliding-friction* dan/atau sistem pendisipasi *lead-rubber*. Sistem *base isolator* dengan *sliding-friction* mengandalkan gesekan antarkomponen yang menyertai pergerakan antar-elemen logam yang memikul gaya normal cukup besar akibat goyangan gempa, di mana elemen-elemen logam yang bergesekan dirancang tidak mengalami kelelahan. Pada sistem friksi dengan tipe pendulum, posisi bangunan dirancang untuk kembali ke posisi awal sebelum goyangan (**Gambar 11**). Pada sistem *base isolation* dengan pendisipasi *lead-rubber*, kerusakan direncanakan hanya terjadi di *base isolator* akibat deformasi yang cukup besar pada lapisan karet dan leleh pada lapisan logam (yang dapat diganti setelah gempa berakhir).



Gambar 9 *Base isolator* pada bangunan tinggi (a) posisi di bangunan, (b) disipasi energi akibat gempa, (c) beberapa jenis *base isolator* (dari kiri: *natural rubber bearing*, *elastomeric bearing*, *lead rubber bearing*) [11]

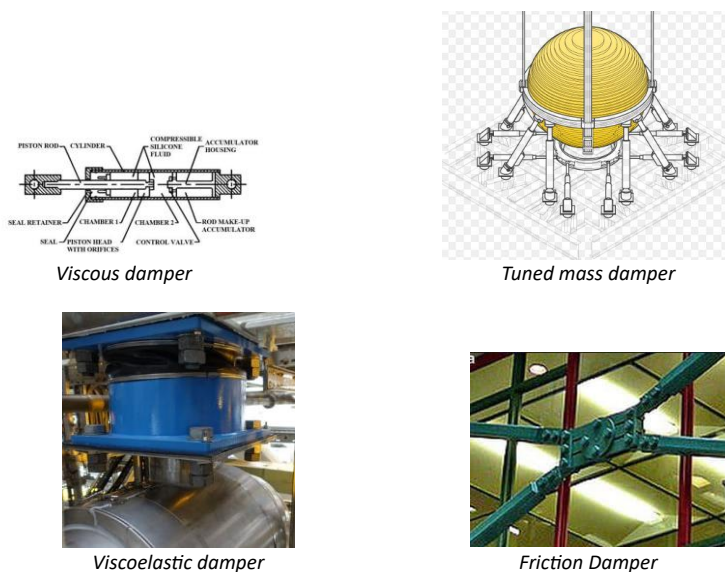


Gambar 10 Kurva histeresis struktur dengan *base isolator* [12]

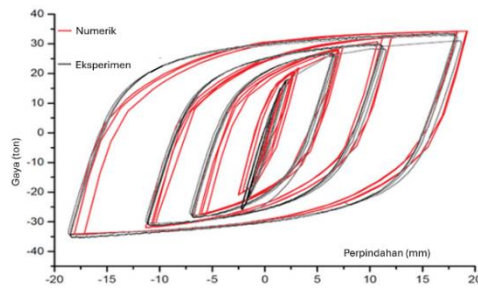


Gambar 11 *Single concave friction pendulum* (a) kondisi diam, (b) kondisi bergerak, (c) diagram gaya, (d) kurva histeresis gaya-perpindahan [13]

3) Pengendalian akibat gempa dengan memasang elemen peredam pada struktur atas bangunan untuk mengurangi besarnya goyangan pada struktur bangunan (**Gambar 12**). Saat ini telah dikembangkan berbagai jenis elemen peredam, baik bersifat kontrol aktif maupun kontrol pasif.



Gambar 12 Disipasi energi akibat gempa melalui elemen redaman (Sumber: <https://theconstructor.org/earthquake/seismic-dampers/8332/>)



Gambar 13 Kurva histeresis struktur dengan *damper* [14]

Strategi pada butir 1 mengandalkan kemampuan struktur mengalami deformasi inelastik yang besar, sedangkan strategi pada butir 2 dan butir 3 mengupayakan pengurangan deformasi yang dialami struktur (dan elemen-elemen struktur) melalui modifikasi struktur berupa penambahan elemen peredam goyangan.

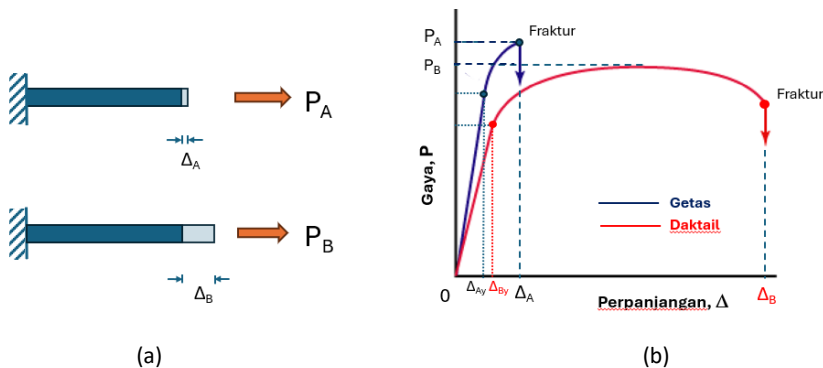
Dalam uraian selanjutnya pada tulisan ini, akan dibahas strategi pertama (butir 1) dan secara khusus pada desain struktur bangunan gedung baja, di mana telah dikembangkan berbagai sistem struktur dengan berbagai jenis sekering berupa elemen baja yang dirancang mengalami leleh dan berdeformasi inelastik cukup besar secara bolak-balik untuk menyerap energi akibat gempa yang membebaninya.

2.1 Daktilitas

Gambar 14 menunjukkan kemampuan dua buah batang logam dengan ukuran geometri sama, namun dengan karakteristik bahan yang berbeda yang ditarik dengan gaya tarik yang besarnya meningkat secara bertahap. Batang A yang bersifat lebih kaku dan getas mengalami leleh pada perpanjangan sebesar Δ_{Ay} namun segera mengalami putus pada perpanjangan sebesar Δ_A ketika gaya tarik mencapai P_A . Batang B yang bersifat lebih daktail mengalami leleh pada perpanjangan sebesar Δ_{By} , dan hanya mampu memikul gaya sebesar $P_B < P_A$, namun mampu bertahan tidak putus hingga mencapai perpanjangan Δ_B , yang jauh lebih besar dari Δ_A ($\Delta_B \gg \Delta_A$).

Besarnya energi yang terlibat dalam proses penarikan batang A dan B ditunjukkan oleh luas daerah yang dibentuk oleh kurva P vs Δ . Batang B mampu menahan gaya tarik lebih besar namun hanya mampu menghadapi energi (akibat tarikan) yang jauh lebih kecil daripada energi yang mampu

dihadapi oleh batang B (walaupun batang B tidak mampu menghadapi gaya tarik sebesar P_A). Hal ini menunjukkan kemampuan elemen struktur untuk mengalami deformasi cukup besar secara inelastik tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti, merupakan hal yang sangat penting dalam menghadapi gangguan mekanis terhadap sebuah struktur.



Gambar 14 Batang Ditarik: (a) perpanjangan pada batang, (b) kurva P vs Δ

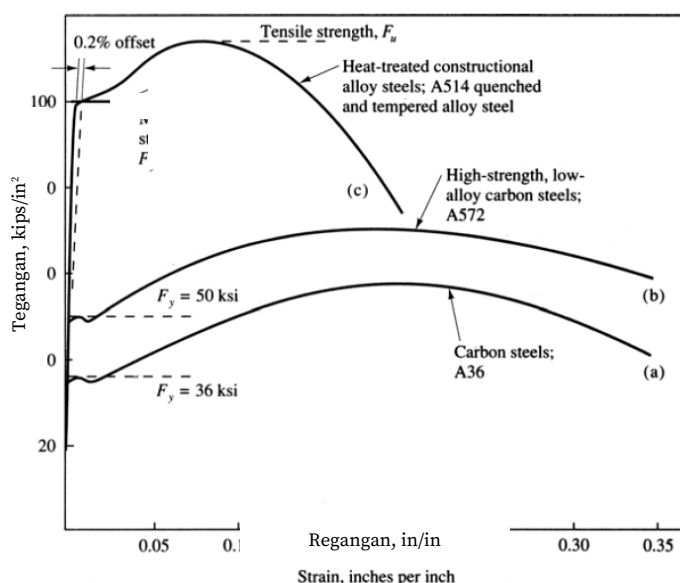
Daktilitas didefinisikan sebagai kemampuan suatu elemen struktur atau struktur untuk mengalami deformasi inelastik yang cukup besar (setelah mencapai kekuatan lelehnya) tanpa mengalami pengurangan kekuatan yang berarti. Batang A memiliki daktilitas, $\mu_A = \Delta_A / \Delta_{Ay}$, sedangkan batang B memiliki daktilitas $\mu_B = \Delta_B / \Delta_{By}$ yang jauh lebih besar dari μ_A .

Selanjutnya, apabila terhadap batang B diberikan gaya tarik secara berulang dengan perpanjangan tiap tarikan tidak melebihi Δ_{Bu} , maka akan terdisipasi sejumlah besar energi akibat pembebanan berulang tanpa mengakibatkan putusnya batang B yang besarnya ditunjukkan oleh luasan yang dibentuk oleh kurva histeresis. Hal ini tidak akan terjadi pada batang A yang walaupun memiliki kekuatan memikul gaya tarik yang lebih besar namun dengan daktilitas yang sangat rendah akan mengalami kegagalan dini. Pembebanan siklik (bolak balik) akibat gempa yang dialami struktur akan mampu dihadapi oleh struktur yang dirancang menggunakan elemen-elemen daktail (dengan kekuatan yang tidak terlalu tinggi) yang akan mendisipasi energi dalam jumlah besar dengan catatan struktur akan mengalami kerusakan berupa elemen-elemen daktail (sekering) yang mengalami deformasi cukup besar tanpa mengakibatkan keruntuhan struktur. Konsekuensi atas kerusakan elemen-elemen daktail selanjutnya dikaji lebih jauh untuk meminimalkan kerugian sekaligus meningkatkan nilai ekonomis

bangunan dalam menghadapi bahaya gempa yang berulang, yaitu pengembangan elemen daktail yang mudah diganti setelah bangunan mengalami gempa.

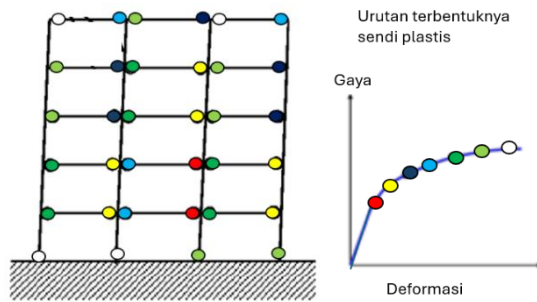
2.2 Kuat Lebih

Gambar 15 menunjukkan respons uji tarik terhadap elemen baja yang terbuat dari beberapa jenis baja dengan kekuatan atau mutu yang berbeda. Elemen baja dengan mutu lebih tinggi dengan kandungan C (karbon) yang tinggi memiliki daktilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan baja mutu rendah. Namun pada umumnya profil baja tetap akan mengalami peningkatan kekuatan setelah melalui kekuatan lelehnya (F_y) sebelum mencapai kekuatan tariknya (F_u). Kuat lebih ini ditentukan oleh karakteristik bahan baja.



Gambar 15 Hasil Uji Tarik untuk berbagai mutu baja [15]

Respons sebuah struktur yang dibentuk oleh sejumlah besar elemen baja terhadap beban lateral ditunjukkan oleh **Gambar 16**. Selain disebabkan oleh kuat lebih yang dimiliki oleh bahan baja, peningkatan kekuatan atau kuat lebih struktur untuk memikul beban lateral juga disebabkan oleh terjadinya kelelahan bertahap (tidak sekaligus) yang dialami oleh sejumlah besar elemen-elemen daktail.

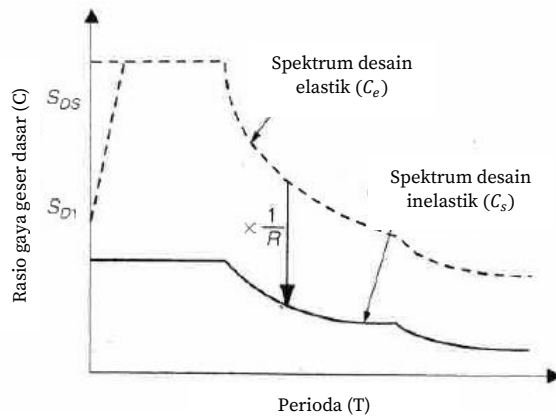


Gambar 16 Respons Struktur Pada Pembebanan Inelastik [16]

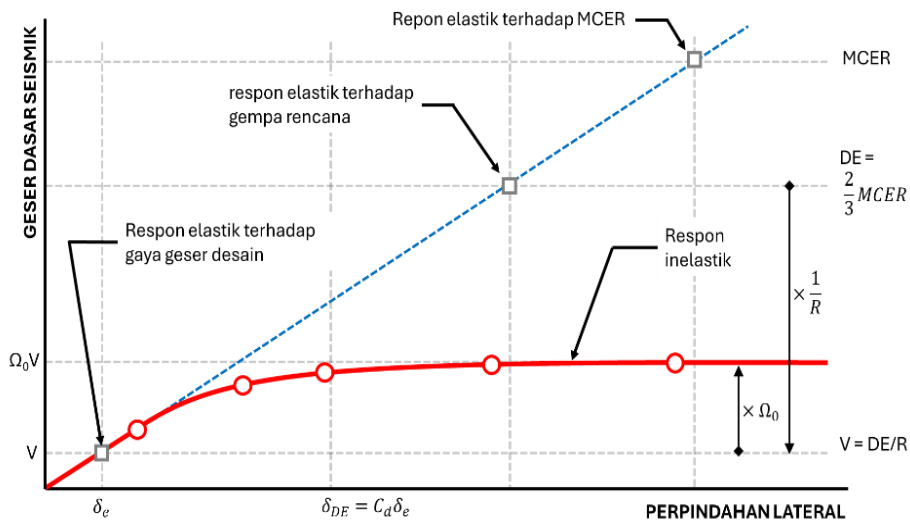
Kelelahan tersebut lebih dikenal dengan pembentukan sendi plastis. Struktur tahan gempa harus dirancang mampu mendisipasi energi sebesar mungkin melalui pembentukan banyak sendi plastis secara bertahap di mana untuk setiap tahapan diperlukan peningkatan beban tanpa terjadi gangguan-gangguan antara lain akibat terjadinya tekuk pada elemen langsing. Peningkatan kekuatan ini akan lebih banyak ditemukan pada struktur yang memiliki derajat kestatistakentuan yang tinggi, yang memungkinkan terbentuknya banyak sendi plastis secara bertahap dan tercapainya kekuatan ultimit struktur yang semakin tinggi.

2.3 Beban Gempa Rencana

Sifat struktur yang daktail dan memiliki kuat lebih digunakan untuk mengurangi atau mereduksi besarnya beban gempa yang diperhitungkan dalam perancangan struktur tahan gempa sedemikian sehingga dapat diperoleh dimensi elemen daktail (sekering) yang lebih kecil untuk memaksa terjadinya kerusakan (kelelahan) pada elemen daktail tersebut. Spektrum respons dari struktur daktail terhadap beban gempa diperoleh dengan mereduksi spektrum respons (elastik) untuk lokasi struktur bangunan tersebut (**Gambar 4**) dengan besaran faktor modifikasi respons struktur, R (**Gambar 17**). Besarnya nilai R yang menggambarkan respons struktur terhadap beban gempa, didasarkan atas tingkat daktilitas dan kuat lebih yang berbeda-beda menurut jenis struktur dengan sifat elemen daktail (sekering) dan mekanisme pelelehan tertentu, seperti ditunjukkan pada **Gambar 18**.



Gambar 17 Spektrum respons desain elastik dan inelastik



Gambar 18 Parameter desain seismik

di mana R : koefisien modifikasi respons struktur

C_d : faktor pembesaran defleksi

Ω_0 : faktor kuat lebih sistem

Tabel 1 menunjukkan besaran parameter desain seismik (R , C_d dan Ω_0) yang digunakan dalam perancangan berbagai jenis sistem struktur pemikul beban gempa.

Tabel 1 Faktor R, Cd, dan Ω_0 untuk sistem pemikul gaya seismik [4]

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5.5
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2.5
Dinding geser beton bertulang khusus	7	2.5	5.5
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5.5
Rangka baja pemikul momen biasa	3.5	3	3

Selanjutnya, SNI 1726-2019 [4] juga mengatur besarnya beban gempa rencana berdasarkan fungsi dan nilai keutamaan bangunan yang dinyatakan dengan parameter I_e , seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**. Faktor $I_e = 1.5$ merepresentasikan bangunan penting yang harus dapat berfungsi sebagai bangunan evakuasi setelah kejadian gempa.

Tabel 2 Faktor keutamaan gempa [4]

Kategori Risiko	Jenis pemanfaatan	Faktor Keutamaan Gempa (I_e)
I atau II	Gudang penyimpanan, rumah, kantor, apartemen, mall, bangunan industri, pabrik, dll	1,0
III	Bioskop, stadion, gedung pertemuan, penjara, klinik, dll	1,25
IV	Sekolah, rumah ibadah, rumah sakit, pemadam kebakaran, fasilitas kesiapan darurat, dll	1,50

Selanjutnya, besarnya beban gempa rencana dapat dirumuskan sebagai

$$V = C_s W \quad (4)$$

dengan V : gaya geser dasar seismik (*base shear*), kN

W : berat seismik efektif, kN

C_s : koefisien respons seismik [4], ditentukan dari nilai perioda struktur, dengan nilai maksimum sebesar

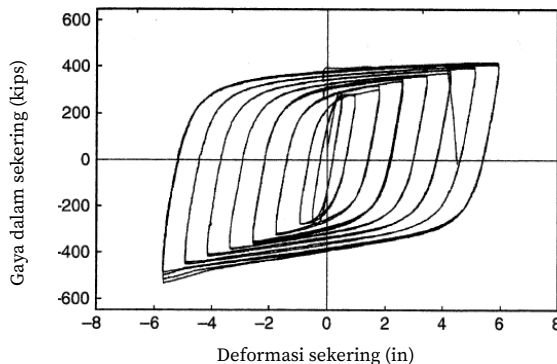
$$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I_e} \quad (5)$$

S_{DS} : parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek

R : faktor modifikasi respons

I_e : faktor keutamaan gempa

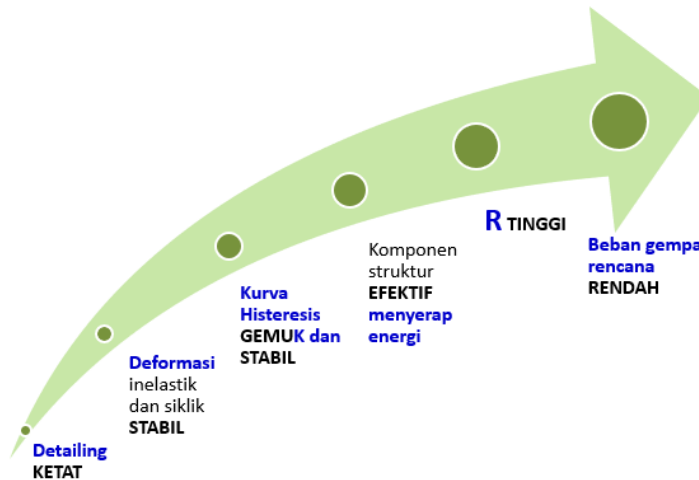
Hal penting yang perlu dipahami adalah bahwa besarnya R untuk sebuah sistem struktur tertentu, merupakan parameter yang menggambarkan sifat daktilitas dan kuat lebih struktur saat **memikul gempa yang berupa beban siklik** yang responnya digambarkan dalam bentuk kurva histeresis seperti terlihat pada **Gambar 19**.



Gambar 19 Kurva histeresis elemen sekering

Nilai R yang tinggi dari sebuah sistem struktur menunjukkan kemampuan struktur (beserta seluruh elemen struktur dan detail sambungannya sebagai satu kesatuan yang terintegrasi) untuk menjamin terbentuknya kurva histeresis yang cukup ‘gemuk’ dan stabil akibat pembebanan bolak-balik selama gempa besar yang diperkirakan akan terjadi. Hal ini yang menjadi syarat penting bagi sistem struktur untuk dapat dirancang dengan beban gempa rencana yang rendah namun mampu bertahan terhadap gempa besar

karena memiliki kemampuan mendisipasi energi melalui deformasi inelastik yang besar dan terkendali.



Gambar 20 Hubungan *detailing* dengan besarnya beban gempa rencana untuk sistem struktur pemikul gempa

Selanjutnya, dengan memperhatikan kinerja dan persyaratan yang diuraikan di atas, berbagai sistem struktur baja pemikul gempa telah dikembangkan dengan mengupayakan sifat daktilitas dari elemen sekering tertentu maupun interaksi di antara elemen-elemen struktur secara terintegrasi yang menghasilkan kuat lebih dan daktilitas yang tinggi.

3 PERANCANGAN KERUSAKAN UNTUK MENCAPAI KETANGGUHAN

3.1 Konsep Perancangan

Perancangan struktur baja tahan gempa akan mencakup dua tahap perancangan, seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**:

- 1) **Perancangan daktilitas**, untuk merancang elemen-elemen sekering yang memiliki daktilitas yang cukup dalam mendisipasi energi akibat gempa besar. Elemen sekering **direncanakan mengalami kerusakan** (leleh) akibat bekerjanya beban gempa, dengan merancang elemen terhadap beban gempa rencana yang besarnya telah direduksi menjadi sebesar R kali lebih kecil. Namun demikian, elemen sekering yang mengalami leleh selama pembebanan siklik akibat gempa, harus dirancang mampu berdeformasi inelastis cukup besar tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti, yang dapat disebabkan antara lain oleh terjadinya tekuk.
- 2) **Perancangan kapasitas**, untuk merancang elemen-elemen struktur lainnya (selain elemen sekering) agar tidak mengalami leleh dan kerusakan, dan **mempertahankan struktur tidak runtuh** sementara elemen-elemen daktil mengalami leleh selama gempa besar terjadi. Dengan demikian elemen-elemen ini dirancang terhadap kondisi ultimit yaitu ketika elemen sekering mencapai kapasitas maksimum yang diperhitungkan, **bukan** terhadap kondisi bekerjanya beban gempa rencana.

Tabel 3 Perancangan elemen struktur pemikul gempa

Parameter Perancangan	Perancangan DAKTILITAS	Perancangan KAPASITAS
Elemen yang dirancang	Elemen sekering	Elemen non-sekering
Dasar analisis dan perancangan	Deformasi pada kondisi elastis	Gaya pada kondisi inelastis
	Beban gempa rencana	Kekuatan ultimit elemen sekering
Spesifikasi bahan	Lebih Ketat	Biasa
Kelangsingan elemen	Daktilitas tinggi	Daktilitas sedang

Dari uraian di atas dapat dinyatakan bahwa sistem struktur dirancang **mengalami kerusakan yang terkendali** (berupa kelelahan pada elemen sekering) dengan dukungan elemen non-sekering yang dirancang dengan kekuatan lebih, agar struktur bangunan dapat bertahan akibat gempa besar, hal mana harus didukung pula dengan terpenuhinya kondisi stabilitas struktur dan integrasi di antara seluruh elemen struktur.

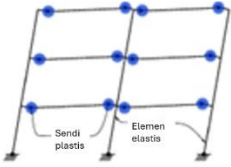
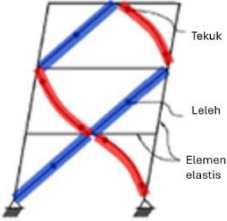
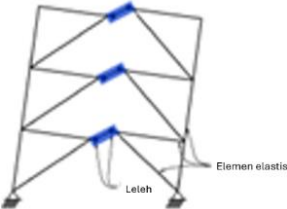
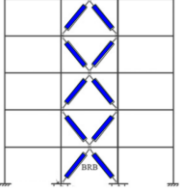
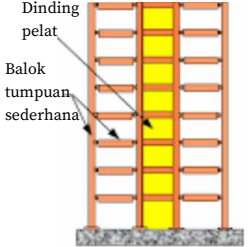
Selanjutnya telah dikembangkan elemen sekering yang dapat diganti (*replaceable*) yang akan membuat **struktur menjadi tangguh** (dan sekaligus ekonomis) terhadap kejadian gempa besar yang diperkirakan akan terjadi berulang kali.

3.2 Sistem Struktur Baja Tahan Gempa

Konsep perancangan sistem struktur pemikul gempa yang mengalami kerusakan pada elemen-elemen daktail telah melahirkan sejumlah besar sistem struktur baja dengan berbagai jenis elemen daktail (sekering) yang terbuat dari bahan baja yang dikenal memiliki daktilitas bahan yang tinggi. Ketentuan perancangan struktur baja tahan gempa yang terdapat dalam SNI 7980:2020 [17] memuat sejumlah sistem struktur baja pemikul gempa yang telah dikembangkan sejauh ini di berbagai negara seperti ditunjukkan pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

Ketentuan dalam SNI 7980-20 [17] merupakan adopsi penuh dari *Seismic Provisions For Structural Steel Buildings (AISC 341-16)* [18] yang diterbitkan oleh American Society of Steel Construction dan mengalami pemutakhiran secara berkala berdasarkan hasil penelitian yang berkembang di seluruh dunia mengenai struktur baja tahan gempa. Ketentuan dan nilai parameter dalam perancangan struktur baja tahan gempa yang diadopsi Indonesia berbeda dengan ketentuan dan nilai parameter di negara lain (Jepang, New Zealand, Eropa, dan lainnya), namun konsep perancangan dengan memanfaatkan lelehnya elemen sekering dalam upaya mendisipasi energi, diadopsi oleh seluruh negara.

Tabel 4 Beberapa sistem struktur baja pemikul gempa

Sistem Struktur	Bagian yang Leleh
 Sendi plastis Elemen elastis	Rangka pemikul momen (<i>Resisting Frame</i>) Ujung-ujung balok (balok tidak menekuk)
 Tekuk Leleh Elemen elastis	Rangka bresing konsentris (<i>Concentrically Braced Frame</i>) Elemen bresing (bresing menekuk)
 Leleh Elemen elastis	Rangka bresing eksentris (<i>Eccentrically Braced Frame</i>) Elemen perangkai / link (bresing tidak menekuk)
	Rangka bresing tahan tekuk (<i>Buckling Restrained Braced Frame</i>) Inti baja yang tidak melekat pada bresing (bresing tidak menekuk)
 Dinding pelat Balok tumpuan sederhana	Dinding geser pelat baja (<i>Steel Plate Shear Wall</i>) Pelat baja yang dipasang sebagai dinding (pelat menekuk)

Tabel 5 Nilai parameter untuk sistem struktur baja pemikul gaya gempa [4]

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5.5
Rangka baja pemikul momen menengah	4.5	3	4
Rangka baja pemikul momen biasa	3.5	3	3
Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2	4
Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	6	2	5
Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3.25	2	3.25
Dinding geser pelat baja	6,5	2,5	5,5
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2,5	5

Berdasarkan sejumlah penelitian yang dilakukan sebelumnya, telah ditentukan nilai parameter seismik (R , C_d , Ω_0) untuk masing-masing sistem struktur. Jumlah dan jenis sistem struktur baja tahan gempa diperkirakan semakin bertambah dengan bertambahnya temuan jenis elemen sekering baru yang mampu mendisipasi energi secara efektif (dan efisien).

4 PERANCANGAN STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA

Penelitian yang intensif mengenai struktur bangunan gedung baja tahan gempa telah berkembang sangat pesat terutama setelah kejadian Gempa Northridge (1994) dan Kobe (1995), baik mengenai aspek kegempaan maupun desain struktur dan elemen struktur tahan gempa. Dalam hal desain struktur tahan gempa berbagai aspek perancangan struktur dan elemen struktur pemikul beban gempa dikaji secara mendalam, dengan mempelajari berbagai fenomena kegagalan yang dialami struktur bangunan baja yang dirancang berdasarkan ketentuan sebelumnya. Hal ini meliputi antara lain: spesifikasi material, dimensi penampang dan elemen struktur, sistem sambungan, sistem struktur dalam memikul beban siklik akibat gempa yang tidak dapat diduga waktu kejadian dan besarnya. Selain itu dilakukan pula pengembangan berbagai bentuk elemen baru sebagai pendisipasi energi gempa maupun peredam goyangan, pengembangan berbagai bentuk sambungan balok-kolom, dan pengembangan berbagai sistem struktur tahan gempa.

Berdasarkan kondisi kegempaan di lokasi struktur baja yang akan dibangun (jarak ke sumber-sumber gempa dan kondisi tanah dasar), dan risiko yang akan ditimbulkan terhadap fungsi bangunan tertentu, dapat ditentukan Kategori Desain Seismik bagi sistem struktur pemikul gempa yang akan dipilih. **Tabel 6** menunjukkan batasan penggunaan beberapa sistem struktur baja pemikul gempa menurut Kategori Desain Seismik (KDS). Nilai faktor modifikasi respons struktur, R yang besar menunjukkan sistem struktur yang daktail dan memiliki kemampuan mendisipasi energi yang tinggi. Pilihan sistem struktur yang akan dibangun dengan Kategori Desain Seismik D akan dibatasi pada sistem struktur dengan nilai R yang tinggi, mengingat bangunan akan menghadapi kondisi kegempaan dan risiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi pada Kategori Desain Seismik B, dan C.

Dalam uraian selanjutnya akan dibahas mengenai aspek-aspek perancangan yang harus dipenuhi oleh sistem struktur dengan nilai R tinggi yang dirancang mampu bertahan terhadap gempa besar melalui kemampuan disipasi energi yang baik.

Tabel 6 Batas penggunaan sistem struktur baja berdasarkan KDS [4]

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R	Batas Sistem dan Tinggi Struktur (m)				
		Kategori Desain Seismik				
		B	C	D	E	F
Rangka baja pemikul momen khusus	8	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	TB	TB	10	TI	TI
Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka baja dengan bresing eksentris	8	TB	TB	48	48	30
Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	6	TB	TB	48	48	30
Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3,25	TB	TB	10	10	TI
Dinding geser pelat baja	6,5	TB	TB	48	48	30
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	TB	TB	48	48	30

* TB = Tidak dibatasi, TI = tidak diizinkan

4.1 Spesifikasi Bahan Baja

Elemen sekering yang daktail pada sistem struktur tertentu harus memiliki sifat material yang daktail, yang umumnya disediakan oleh bahan baja dengan kandungan karbon rendah sehingga memberikan kemungkinan untuk mengalami leleh pada beban yang tidak terlalu tinggi namun memberikan kemampuan berdeformasi inelastik cukup besar jauh sebelum mencapai batas putusnya. SNI 7860-2020 [17] mensyaratkan spesifikasi bahan baja elemen sekering sebagai berikut:

- 1) Tegangan leleh minimum nominal tidak melebihi 345 MPa;
- 2) Menunjukkan daerah *plateau* yang cukup panjang
- 3) *Strain-hardening* yang cukup memadai, $F_y/F_u < 0.85$
- 4) Regangan tarik yang besar, $\epsilon_u > 20\%$
- 5) Mudah dilas

4.2 Stabilitas

Salah satu tantangan terbesar yang harus dihadapi struktur baja secara umum adalah masalah tekuk atau instabilitas baik tekuk pada pelat penampang maupun tekuk pada elemen struktur, akibat mengalami gaya tekan. Hal ini disebabkan karena dimensi elemen struktur baja yang umumnya tipis dan

langsing (karena memiliki kekuatan bahan yang relatif tinggi), sehingga akan lebih dahulu mengalami tekuk sebelum mampu mencapai kekuatan ultimit dari elemen tersebut (**Gambar 21** dan **Gambar 22**).



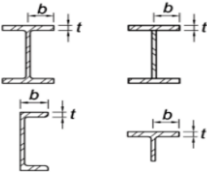
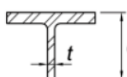
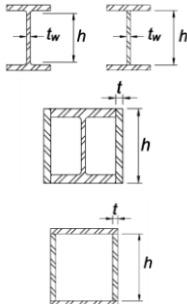
Gambar 21 Tekuk pada pelat penampang [19]

Parameter kelangsingan digunakan untuk menggambarkan bahaya tekuk pada pelat penampang maupun elemen struktur. Kelangsingan penampang, λ , didefinisikan sebagai rasio antara dimensi lebar pelat dan tebal pelat. Untuk penampang *Wide Flange*, dikenal kelangsingan pelat sayap, $\lambda_f = b/t$, dan kelangsingan pelat badan, $\lambda_w = h/t$. Kedua nilai kelangsingan ini dibatasi untuk elemen yang dirancang sebagai sekering (dengan daktilitas tinggi), maksimum sebesar λ_{hd} . Sedangkan untuk elemen non-sekering lain dengan daktilitas sedang dibatasi sebesar λ_{md} . Tabel 7 menunjukkan beberapa nilai batas kelangsingan dari beberapa penampang baja yang umum digunakan dalam struktur baja tahan gempa, yang ditentukan oleh nilai Modulus Elastisitas Baja, E , dan tegangan leleh minimum terspesifikasi, F_y .



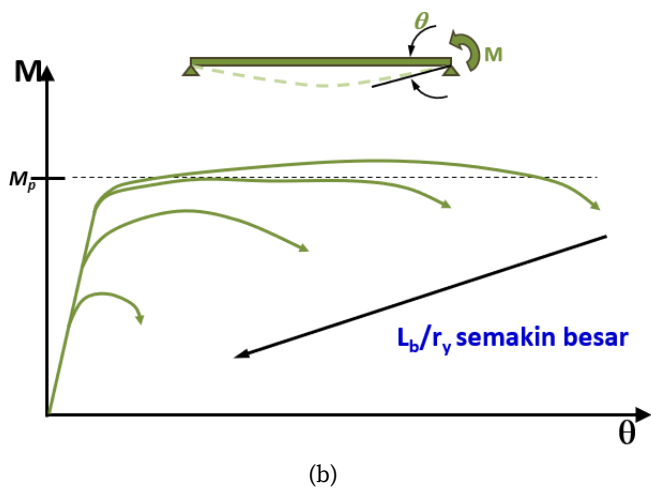
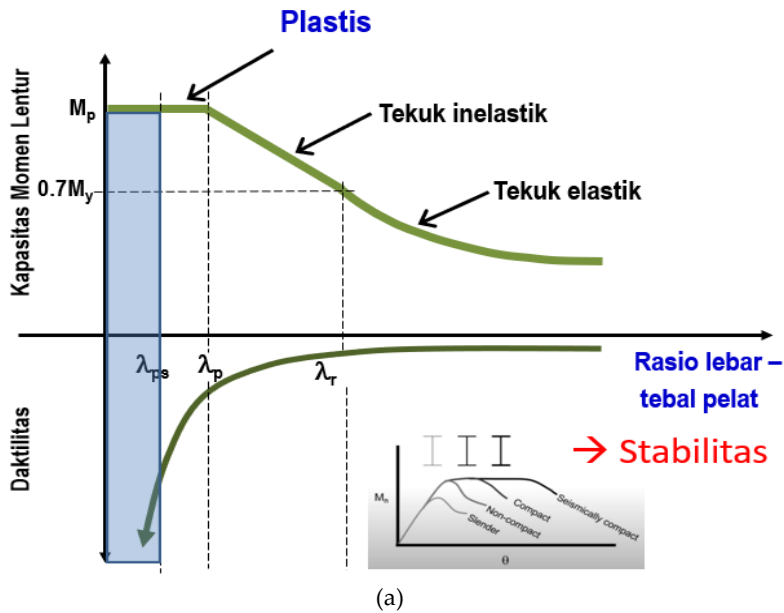
Gambar 22 Tekuk pada elemen [19]

Tabel 7 Contoh batasan rasio lebar terhadap tebal penampang untuk beberapa elemen struktur tahan gempa [18]

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar Terhadap Tebal	Batasan Rasio Lebar Terhadap Tebal	
			λ_{hd} Komponen Struktur Daktilai Tinggi	λ_{md} Komponen Struktur Daktilai Sedang
1		b/t	$0,32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0,40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
2		d/t	$0,32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0,40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
3		h/t_w h/t	Untuk $C_a \leq 0,114$ $2,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (1 - 1,04 C_a)$ Untuk $C_a > 0,114$ $0,88 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (2,68 - C_a)$ $\geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$ Dengan $C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y}$ $P_y = R_y F_y A_g$	Untuk $C_a \leq 0,114$ $3,96 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (1 - 3,04 C_a)$ Untuk $C_a > 0,114$ $1,29 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (2,12 - C_a)$ $\geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$ Dengan $C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y}$ $P_y = R_y F_y A_g$
4		h/t	$0,67 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$1,75 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
5		D/t	$0,053 \frac{E}{R_y F_y}$	$0,062 \frac{E}{R_y F_y}$

Elemen yang mengalami tekuk tidak memiliki kekuatan yang cukup dan tidak dapat mempertahankan kekuatannya untuk berdeformasi inelastik yang cukup besar. Dengan perkataan lain, elemen yang mengalami tekuk memiliki

daktilitas yang rendah. **Gambar 23** memperlihatkan hubungan antara kelangsingan elemen dan nilai daktilitas elemen.



Gambar 23 Pengaruh kelangsingan terhadap daktilitas [19]

Elemen yang dirancang sebagai sekering, selain harus terbuat dari penampang yang memenuhi persyaratan di atas, juga harus mampu tidak mengalami tekuk sepanjang elemen tersebut selama pembebanan siklik akibat gempa, yang antara lain berupa tekuk torsi lateral, seperti tampak pada **Gambar 24**.



Gambar 24 Tekuk torsi lateral pada balok

Kondisi tekuk sepanjang elemen dapat dihindari dengan memasang pengekang lateral dengan jarak tertentu. Jarak maksimum antar pengekang lateral, L_b untuk elemen sekering dengan daktilitas tinggi yang harus mampu mengalami deformasi inelastik cukup besar tanpa mengalami tekuk torsi lateral, ditentukan berdasarkan mutu baja dan jari-jari girasi penampang terhadap sumbu lemahnya. Untuk penampang berbentuk I, nilai L_b menurut SNI 7860-2020 [17] ditentukan sebesar:

$$L_b = 0.095r_y E / R_y F_y \quad (6)$$

dengan r_y : jari-jari girasi terhadap sumbu lemah penampang, mm

R_y : rasio kekuatan leleh terekspektasi terhadap kekuatan leleh minimum terspesifikasi

4.3 Daktilitas

Dari uraian di atas mengenai spesifikasi bahan dan stabilitas, dapat disimpulkan bahwa sistem struktur yang memiliki daktilitas tinggi mensyaratkan perancangan elemen sekering terbuat dari bahan baja dengan daktilitas tinggi (yang umumnya bukan baja mutu tinggi) dan kemampuan pelat penampang dan elemen sekering untuk tidak mengalami tekuk selama mengalami deformasi inelastik akibat beban siklik dari gempa besar. Penampang elemen sekering yang leleh sebagai sendi plastis untuk mendisipasi energi gempa sebanyak mungkin, harus mampu mengalami deformasi inelastik yang cukup besar berupa perpanjangan (akibat gaya tarik pada elemen tarik), perpendekan (akibat gaya tekan pada elemen tekan), atau rotasi (akibat momen lentur atau gaya geser pada elemen balok), tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti.

Kinerja struktur yang baik dalam menghadapi bahaya gempa diukur antara lain dari kurva histeresis yang ‘**gemuk**’ dan **stabil** pada deformasi siklik inelastik yang besar. Struktur yang berperilaku seperti inilah yang dirancang **tangguh** untuk menghadapi bahaya gempa yang tidak dapat diperkirakan dengan tepat besar dan waktu kejadiannya.

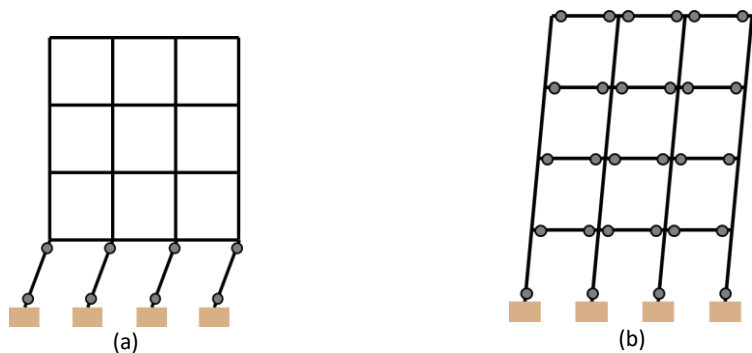
4.4 Kuat Lebih dan Desain Kapasitas

Terkait perancangan kapasitas, elemen non-sekering pada sistem struktur pemikul gempa dirancang untuk mengimbangi gaya-gaya yang terjadi pada elemen sekering yang dihitung berdasarkan kapasitas atau kekuatan ultimit yang akan dicapai elemen sekering pada saat terjadi gempa besar. Kekuatan ultimit elemen sekering harus diperhitungkan terhadap tegangan leleh yang sebenarnya akan terjadi, **bukan** terhadap nilai tegangan leleh nominal (terspesifikasi) yang menjadi dasar perancangan elemen sekering. **Tabel 8** menunjukkan nilai R_y yaitu rasio antara tegangan leleh ekspektasi dan tegangan leleh nominal dari berbagai penampang baja dengan mutu yang berbeda. Nilai-nilai R_y ini ditentukan berdasarkan data statistik hasil uji tarik terhadap ribuan produk baja di Amerika Serikat, yang belum tentu selalu sama dengan kondisi produk pabrik baja di Indonesia, walaupun mengacu pada spesifikasi baja yang sama. Hal ini telah diamati Penulis pada penelitian awal [20] yang saat ini akan dilanjutkan dengan melibatkan lebih banyak data hasil uji tarik produk baja yang beredar di Indonesia, agar dapat diperoleh nilai yang valid dan dapat diandalkan.

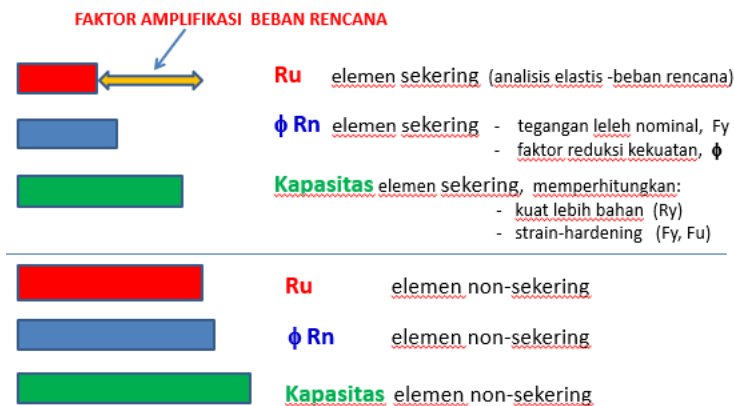
Tabel 8 Nilai R_y dan R_t untuk Material Baja [17]

Penggunaan Material Baja	R_y	R_t
Profil baja gilas panas dan batangan		
ASTM A36	1,5	1,2
ASTM A992	1,1	1,1
ASTM A588	1,1	1,1
ASTM A529 Gr. 50	1,2	1,2
Penampang Struktur Berongga (PSR)		
ASTM A500 Gr. B	1,4	1,3
ASTM A501	1,4	1,3
ASTM A53	1,6	1,2
Pelat baja		
ASTM A36	1,3	1,2
ASTM A572 Gr. 42	1,3	1,0
ASTM A588	1,1	1,2
ASTM A1043 Gr. 50	1,2	1,1

Sebuah struktur yang dirancang dengan elemen sekering yang daktail, dapat mengalami kegagalan akibat perancangan yang kurang baik pada elemen non-sekering. Kegagalan yang ditunjukkan pada **Gambar 25a** dapat disebabkan karena sebelum elemen sekering mengalami leleh seperti yang direncanakan (dalam hal ini balok dengan daktilitas tinggi), ternyata telah terjadi kelelahan atau kegagalan pada elemen non-sekering (dalam hal ini kolom yang seharusnya mampu bertahan).



Gambar 25 Kerusakan struktur bangunan (a) *soft story* dan (b) *beam sway*



Gambar 26 Perancangan elemen sekering dan elemen non-sekering: kuat perlu (R_u) $\leq$ kuat rencana (ϕR_n) $\leq$ kapasitas elemen

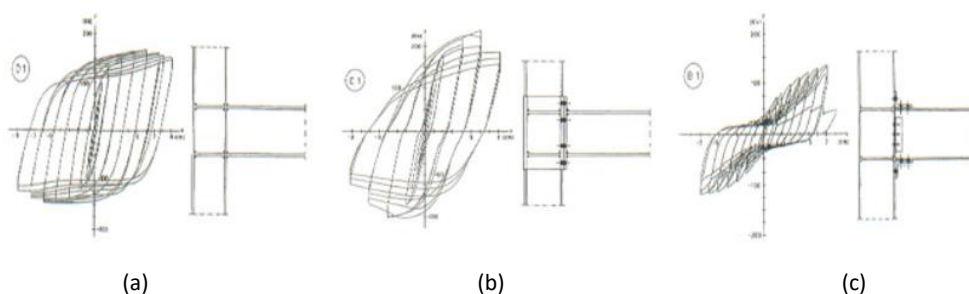
4.5 Sistem Sambungan

Sistem struktur pemikul gempa dengan nilai R yang tinggi dituntut mampu berdeformasi inelastik yang cukup besar dan mampu mengalami pertambahan kekuatan yang cukup signifikan setelah sendi plastis pertama terbentuk pada elemen sekering (**Gambar 18**). Kinerja sistem struktur

pemikul gempa tidak hanya cukup ditentukan oleh perancangan elemen sekering yang daktail dan elemen non-sekering yang memberikan kekuatan lebih; namun harus disertai dengan perancangan sistem sambungan yang tetap elastik dan tidak rusak akibat gempa. Untuk sistem struktur bangunan penting yang dirancang terhadap bahaya gempa yang besar, sambungan harus dirancang dengan lebih ketat, hal mana sering tidak diperhatikan oleh pelaku konstruksi pada saat ini.

Perancangan sambungan berdasarkan perhitungan gaya dalam yang harus disalurkan antara elemen sekering dan elemen non-sekering, **tidak cukup** untuk memastikan sistem sambungan akan tetap dapat berfungsi dengan baik selama berlangsungnya pembebanan siklik akibat gempa. Kinerja sistem sambungan yang mampu mendisipasi energi akibat gempa **harus dibuktikan** melalui uji pembebanan siklik di laboratorium yang mengonfirmasi terbentuknya kurva histeresis yang ‘gemuk’ dan ‘stabil’ akibat pola pembebanan siklik yang ditentukan, sebagai representasi pembebanan gempa besar yang akan dialaminya.

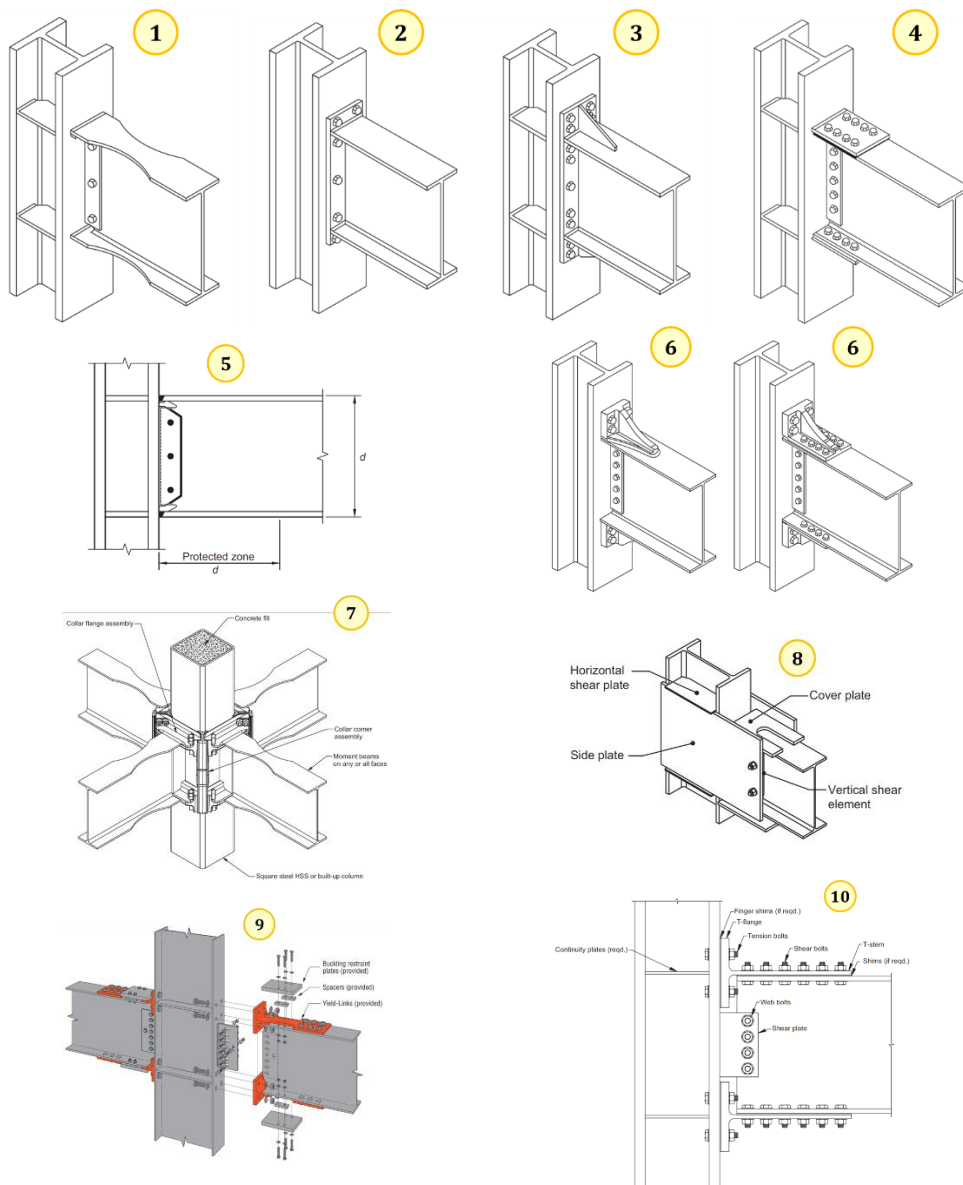
Gambar 27 menunjukkan beberapa sistem sambungan pada sistem pemikul momen dengan kurva histeresis yang berbeda. Sambungan las (**Gambar 27a**) menunjukkan kinerja disipasi energi yang baik berupa kurva histeresis yang ‘gemuk’ dan ‘stabil’.



Gambar 27 Kinerja sambungan balok-kolom [21], (a) *Welded*, (b) *End-plate*, (c) *Angle-cleat*

SNI 7962-2020 [17] yang diadopsi dari AISC 358-16 *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications* [22] memuat sejumlah sistem sambungan balok-kolom yang telah terbukti berkinerja baik pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dan Menengah (**Gambar 28**). Perancangan alat sambung dan pelat penyambung harus memenuhi ketentuan dan perhitungan untuk masing-masing sistem

sambungan yang tertulis dalam SNI 7860-2020 [17] maupun 7972-2020 [23], yang meliputi aspek mutu bahan, jenis dan dimensi balok, dimensi lokasi sendi plastis pada balok, dimensi pelat penyambung dan pelat penerus, las dan cara pengelasan, mutu - posisi baut dan cara pemasangannya, dan sebagainya.

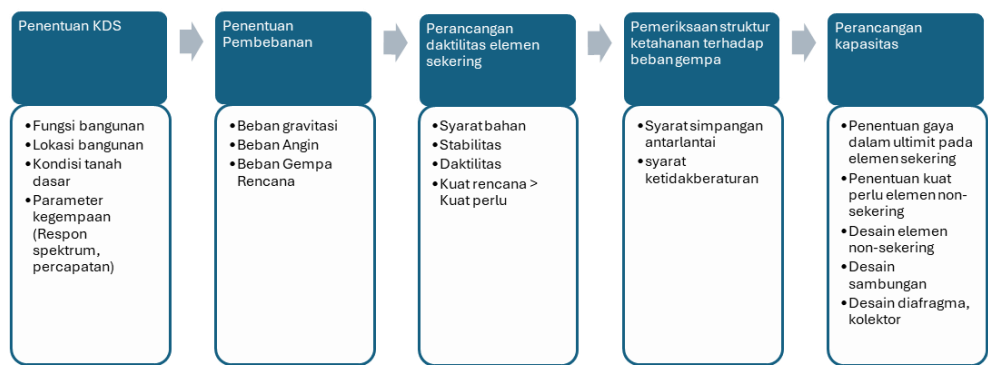


Gambar 28 Tipe sambungan terprakuifikasi (1) penampang balok tereduksi, (2) pelat ujung diperpanjang berbaut dan tanpa pengaku, (3) pelat ujung diperpanjang berbaut dengan pengaku, (4) pelat sayap berbaut, (5) sayap dilas tanpa penguat badan dilas, (6) braket Kaiser berbaut, (7) sambungan momen Contech Conxl, (8) sambungan momen *sideplate*, (9) sambungan momen *Simpson strong-tie strong frame*, (10) sambungan momen T-ganda [22]

Kecuali untuk sistem sambungan *Simpson Strong-Tie Strong Frame*, sistem sambungan umumnya dirancang tidak mengalami leleh dalam menyalurkan momen lentur dan gaya geser pada ujung balok yang leleh dan mencapai kekuatan ultimitnya. Sedangkan pada sistem sambungan *Simpson Strong Tie Strong Frame*, balok dirancang tetap elastik dan sambungan dirancang sebagai elemen sekering yang mengalami leleh dan mendisipasi energi. Pendekatan ini merupakan pengembangan yang belakangan ini mulai dilakukan termasuk oleh Penulis bersama tim penelitian di ITB.

Guna menjamin berlangsungnya aliran gaya dalam seperti yang dirancang di antara seluruh elemen struktur dan sambungan akibat pembebanan gempa, perlu diperhatikan pula kekuatan elemen-elemen struktur non-sekering yang berperan mengalirkan gaya inersia akibat gempa mulai dari pelat lantai (di mana terdapat konsentrasi massa bangunan), balok anak, balok induk, dan elemen vertikal pemikul gempa (kolom, sistem bresing, dinding geser). Elemen diafragma dan kolektor harus dirancang tetap elastik saat menyalurkan gaya-gaya dalam ultimit akibat gempa.

Perancangan struktur baja pemikul gempa yang mengandalkan kerusakan pada elemen sekering sebagai pendisipasi energi, beserta syarat dan ketentuan perancangannya, dapat digambarkan secara singkat dengan diagram alir pada **Gambar 29**.



Gambar 29 Perancangan struktur baja pemikul gempa dengan kerusakan pada elemen sekering

5 SISTEM STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA

Dalam uraian di bawah ini akan disampaikan beberapa sistem struktur baja pemikul gempa yang telah dikembangkan dan ketentuan perancangannya telah diadopsi SNI 7860-2020 [17] dari ketentuan AISC 341-2016 [18].

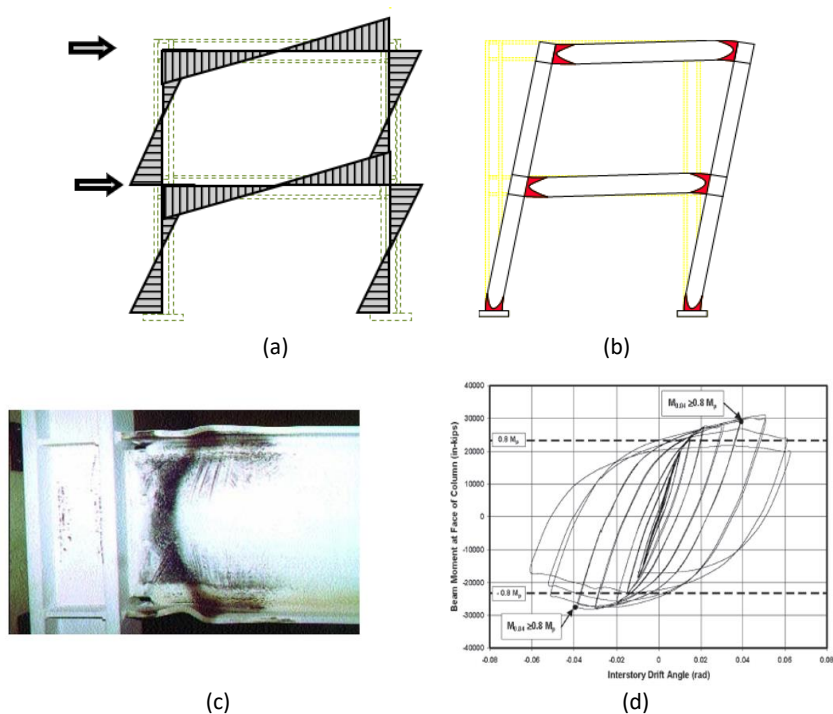
5.1 Sistem Rangka Pemikul Momen

Sistem Rangka Pemikul Momen (*Moment Frame*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 30** dicirikan oleh hubungan balok-kolom yang memikul momen lentur dan dirancang mampu berdeformasi inelastik selama pembebanan siklik akibat gempa melalui pelelehan lentur pada ujung-ujung balok (sendi plastis) secara efektif dan stabil, sedangkan kolom dirancang lebih kuat daripada balok. Berdasarkan kinerja seismik berupa kemampuan berdeformasi inelastik dalam mendisipasi energi, dikenal 3 jenis sistem rangka pemikul momen: Khusus, Menengah, dan Biasa. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus memiliki kinerja seismik dan parameter desain seismik yang paling tinggi seperti ditunjukkan pada **Tabel 5**



Gambar 30 Sistem rangka pemikul momen khusus (*special moment frame*) [19]

Gambar 31 menunjukkan bidang momen akibat beban lateral, posisi dan bentuk kerusakan (sendi plastis) pada ujung-ujung balok, serta kurva histeresis yang terbentuk akibat beban lateral yang bekerja bolak-balik (siklik).



Gambar 31 Sendi plastis akibat beban lateral (a) bidang momen, (b) posisi sendi plastis, (c) sendi plastis, (d) kurva histeresis [19]

Perancangan daktilitas dilakukan terhadap balok sebagai elemen sekering yang mengalami leleh lentur pada kedua ujungnya akibat beban gempa rencana yang dihitung dengan menggunakan nilai $R = 8$ untuk sistem rangka pemikul momen khusus. Persyaratan daktilitas balok sebagai elemen daktil tinggi (*Highly Ductile Member*) harus diperiksa terhadap mutu baja, terhadap kelangsingan penampang (pelat sayap, pelat badan), dan terhadap jarak antarpengkekang lateral pada balok. Selain itu, sistem balok-kolom pemikul momen harus memiliki daktilitas tinggi yang dinyatakan dengan kemampuan struktur mengakomodasi deformasi inelastis berupa simpangan antar lantai mencapai 0.04 radian tanpa mengalami penurunan kekuatan lebih besar dari 20%.

Perancangan kapasitas diawali dengan menentukan jenis sambungan seismik sesuai dengan ketentuan dalam SNI 7972-2020. Besarnya kuat geser perlu balok, kuat lentur dan kuat geser perlu kolom, ditentukan berdasarkan nilai kapasitas momen lentur balok, M_{pr} , yaitu momen maksimum yang mungkin terjadi pada lokasi sendi plastis yang dihitung dengan menggunakan nilai R_y dari bahan balok dan berdasarkan jenis sambungan seismik. Untuk

sambungan Baut tipe *Extended Plate*, besarnya kapasitas momen balok, M_{pr} dihitung sebagai:

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e \quad (7)$$

dengan C_{pr} : faktor untuk memperkirakan kekuatan puncak sambungan, termasuk pengerasan regangan, pengekanan lokal, penguatan/penulangan tambahan, dan kondisi-kondisi sambungan lainnya

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1,2 \quad (8)$$

Besarnya momen lentur perlu pada kolom dihitung berdasarkan keseimbangan momen pada titik pertemuan sumbu balok dan kolom akibat bekerjanya M_{pr} pada lokasi sendi plastis balok dan gaya geser yang bekerja di tengah bentang balok-balok dan kolom-kolom. Untuk menjamin mekanisme disipasi energi berlangsung dengan efektif dan stabil selama kejadian gempa tanpa terjadinya keruntuhan akibat kegagalan kolom, kekuatan kolom harus diperiksa terhadap balok dengan konsep *strong-column weak-beam*:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} \geq 1.0 \quad (9)$$

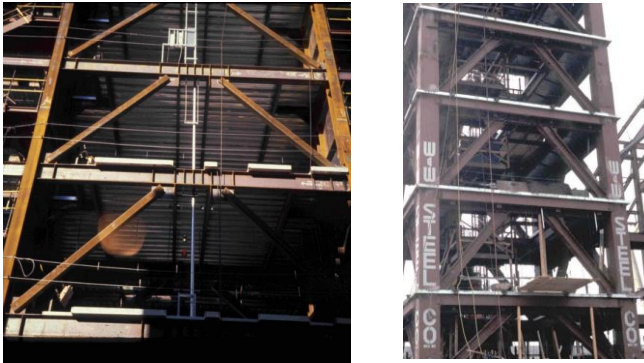
dengan $\sum M_{pc}^*$ dan $\sum M_{pb}^*$ masing-masing adalah jumlah dari proyeksi kuat lentur kolom dan balok pada pertemuan sumbu balok-kolom.

Selanjutnya perlu dirancang *panel zone* (pertemuan balok dan kolom) terhadap kemungkinan kegagalan geser akibat bekerjanya gaya geser yang cukup besar pada saat balok mencapai kekuatan ultimitnya. Juga diperiksa perlunya pelat terusan yang meneruskan gaya tarik dan gaya tekan pada pelat sayap atas dan bawah dari balok yang menumpu kolom.

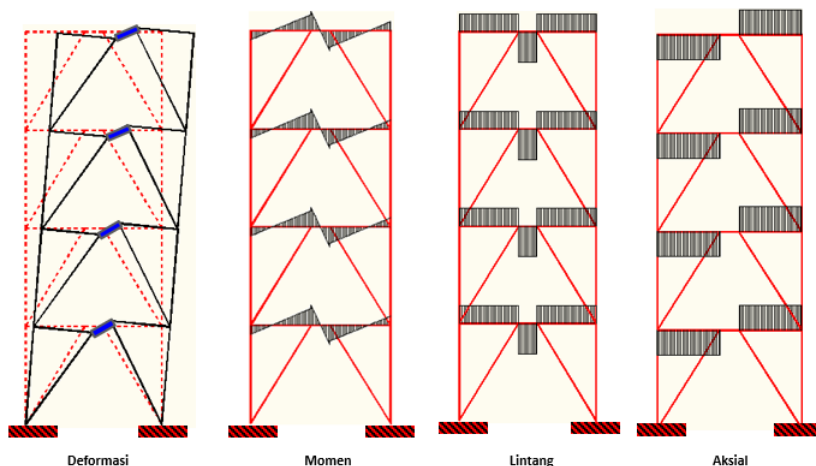
Perancangan sistem rangka pemikul momen khusus dengan berbagai ketentuan yang diuraikan di atas menunjukkan **kerusakan yang terkendali** pada ujung-ujung balok direncanakan untuk mendisipasi energi melalui kelelehannya, sementara kolom dan sambungan direncanakan tetap elastik, untuk menghasilkan **struktur bangunan yang tangguh**, yang dapat bertahan terhadap terjadinya gempa yang besar.

5.2 Sistem Rangka Berpengaku Eksentris

Sistem Rangka Berpengaku Eksentris - SRBE (*Eccentrically Braced Frames*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 32** dirancang mampu berdeformasi inelastik yang signifikan selama pembebanan siklik akibat gempa melalui pelelehan elemen sekering (berupa elemen perangkai atau link) secara efektif dan stabil, sedangkan elemen non-sekering (balok di luar link, pengaku diagonal, dan kolom) dirancang tetap elastik dan lebih kuat daripada link.



Gambar 32 Sistem rangka berpengaku eksentris (*eccentrically braced frame*) [19]



Gambar 33 Deformasi dan gaya-gaya dalam pada sistem rangka berpengaku eksentris akibat beban lateral

Gambar 33 memperlihatkan momen lentur dan gaya geser paling besar (akibat beban lateral pada sistem rangka) terjadi di elemen link. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan akibat beban gempa dapat berupa leleh lentur di mana momen lentur yang terjadi lebih besar daripada kuat leleh

lentur link; atau berupa leleh geser di mana gaya geser yang terjadi lebih besar daripada kuat leleh geser link.

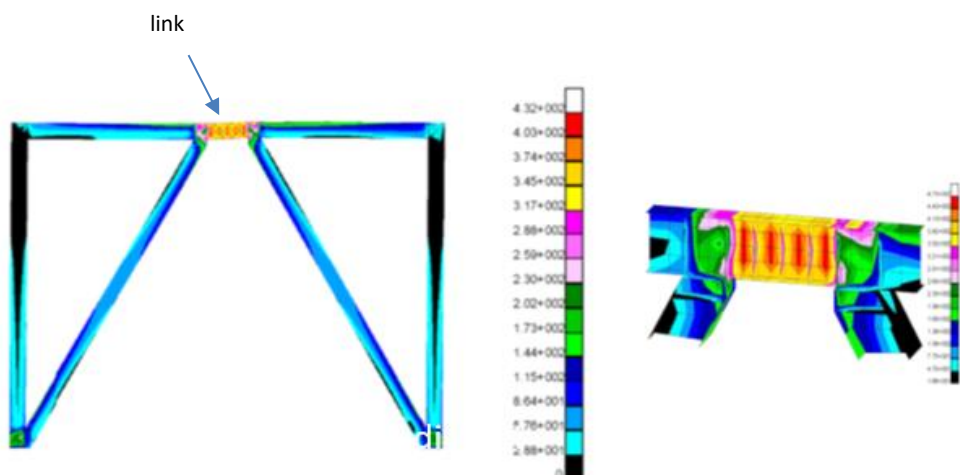
Perancangan daktilitas dilakukan terhadap elemen link sebagai elemen sekering akibat beban gempa rencana yang dihitung dengan menggunakan nilai $R = 8$. Panjang link akan menentukan kerusakan yang terjadi. Link yang leleh atau rusak karena dominasi geser (dan disebut link geser) berukuran lebih pendek dan dirancang berdasarkan kuat leleh geser penampang link, V_p . sedangkan link lentur berukuran lebih panjang dan dirancang berdasarkan kuat leleh lentur penampang link, M_p . Untuk link dengan penampang - I:

$$V_p = 0,6 A_w F_y \quad (10)$$

$$M_p = Z_e F_y \quad (11)$$

dengan A_w adalah luas pelat badan, dan Z_e adalah modulus plastis penampang.

Kasai [24] menunjukkan bahwa link yang mengalami leleh akibat geser (disebut link geser) cenderung lebih efektif mendisipasi energi melalui terbentuknya rotasi link geser yang besar secara stabil akibat pembebanan siklik. **Gambar 34** menunjukkan tegangan yang terjadi pada SRBE dengan link geser akibat gaya lateral pada struktur. Tegangan yang jauh lebih besar bekerja di elemen link terutama pada pelat badan yang memikul gaya geser besar sepanjang link.

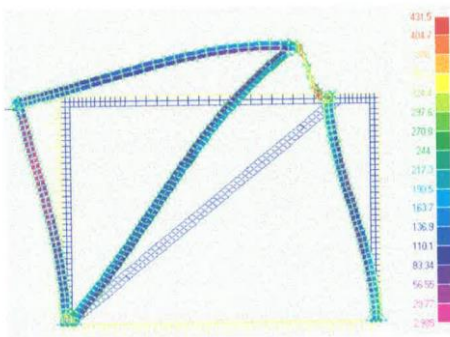


Gambar 34 Tegangan pada struktur SRBE akibat beban lateral [25]

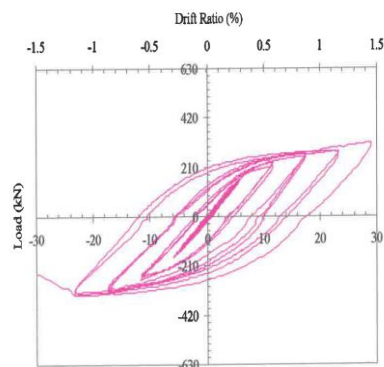
Gambar 35 menunjukkan perilaku SRBE pada pengujian di laboratorium yang mengalami deformasi inelastis yang cukup besar akibat beban lateral siklik [26]. Terlihat bahwa kerusakan hanya terjadi di elemen link, sementara balok, pengaku diagonal, dan kolom tetap dalam keadaan lurus.



(a)



(b)



(c)

Gambar 35 Perilaku elemen link sebagai pendisipasi energi pada struktur: (a) kerusakan pada link, (b) distribusi tegangan, (c) kurva histeresis [26]

Persyaratan elemen link sebagai elemen dengan daktilitas tinggi (*Highly Ductile Member*), baik sebagai link geser maupun link lentur, harus diperiksa terhadap mutu baja, terhadap kelangsingan penampang (pelat sayap, pelat badan), dan terhadap kemungkinan kegagalan sambungan link ke elemen lainnya. Penelitian yang dilakukan menunjukkan ketebalan pelat penyambung, luas pelat sayap penyalur gaya tarik dan tekan, dan diameter baut juga menentukan kinerja sambungan link yang baik sebagai pendukung kinerja link sebagai elemen pendisipasi energi [25]. Selain itu, pengekan lateral perlu diberikan sepanjang link untuk menghindari tekuk selama link yang leleh (rusak) mengalami pembebanan siklik yang besar.

Perancangan kapasitas pada elemen non-sekering (balok, pengaku diagonal, dan kolom) dilakukan untuk menjamin elemen-elemen tersebut masih dalam kondisi elastis pada saat elemen link mengalami rotasi inelastis yang besar dan struktur secara keseluruhan menunjukkan kuat lebih yang signifikan akibat pembebanan siklik. Untuk link yang terbuat dari profil I, ketentuan SNI 7860-2020 [17] mensyaratkan elemen-elemen non-sekering tersebut dan sambungan elemen link dirancang terhadap 1,25 kali kuat geser nominal link yang terpasang, atau terhadap gaya geser pada ujung link sebesar $1,25R_yV_n$. Sambungan link ke kolom perlu dirancang agar mampu mengakomodasi rotasi link besar tanpa membahayakan kolom.

Walaupun struktur dirancang memiliki kemampuan berdeformasi inelastik yang cukup besar, yang ditunjukkan oleh sudut rotasi link yang besar, namun besarnya sudut rotasi plastis link perlu dibatasi untuk menghindari terjadinya kegagalan akibat instabilitas struktur secara keseluruhan. **Tabel 9** menunjukkan ketentuan dalam SNI 7860-2020 [17] tentang batasan sudut rotasi plastis link yang direncanakan.

Perancangan sistem rangka berpengaku eksentris yang diuraikan di atas menunjukkan **kerusakan yang terkendali** pada elemen link direncanakan untuk mendisipasi energi melalui kelelehannya, sementara balok, pengaku diagonal, kolom, dan sambungan direncanakan tetap elastis, untuk menjamin **struktur bangunan yang tangguh**, yang dapat bertahan terhadap terjadinya gempa yang besar.

Tabel 9 Batasan besarnya sudut rotasi rencana link [17]

Tipe Link	Panjang Link	Sudut Rotasi Link Pada Simpangan Tingkat Rencana
Link panjang / Link lentur	$e > 2,6 M_p/V_p$	$\gamma_p < 0,02 \text{ rad}$
Link pendek / Link geser	$e < 1,6 M_p/V_p$	$\gamma_p < 0,08 \text{ rad}$

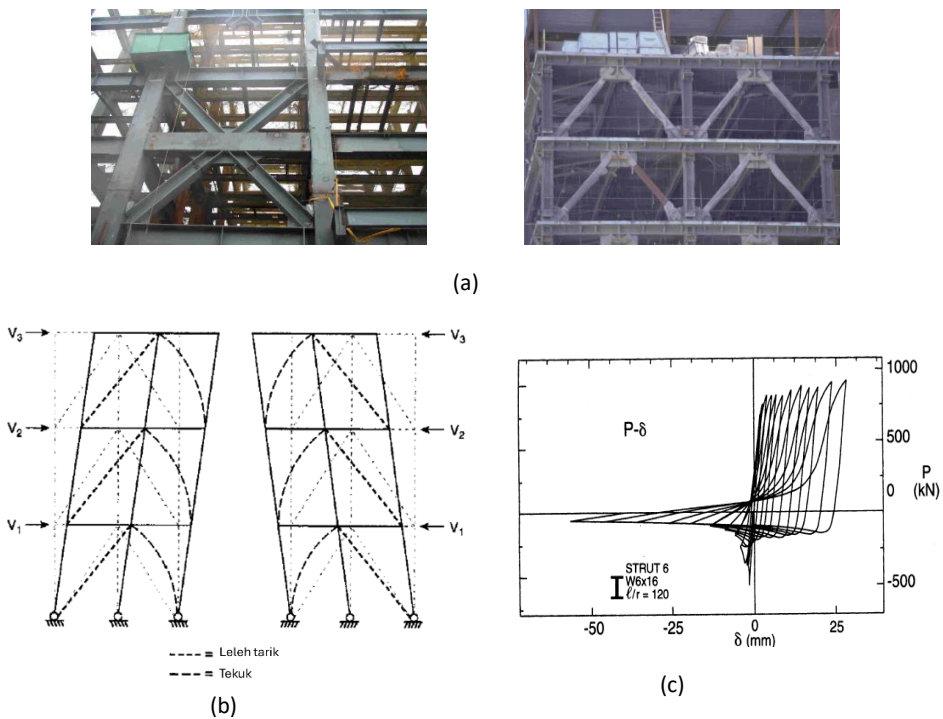
5.3 Sistem Struktur Tahan Gempa Lainnya

5.3.1 Sistem Rangka Berpengaku Konsentris

Sistem Rangka Berpengaku Konsentris (*Concentrically Braced Frame*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 36** dirancang mampu berdeformasi inelastik

selama pembebanan siklik akibat gempa melalui kerusakan pada elemen sekering berupa pengaku (bresing) yang mengalami leleh ketika mengalami gaya tarik dan tekuk ketika mengalami gaya tekan. Berdasarkan kinerja seismik berupa kemampuan berdeformasi inelastis dalam mendisipasi energi, dikenal 2 jenis sistem rangka berpengaku konsentris: Khusus dan Biasa. Sistem Rangka Berpengaku Konsentris Khusus memiliki kinerja seismik dan parameter desain seismik yang lebih tinggi seperti ditunjukkan pada **Tabel 5**

Pada Sistem Rangka Berpengaku Konsentris Khusus, perancangan daktilitas dilakukan terhadap elemen sekering yang harus mampu mengalami leleh tarik dan tekuk cukup besar secara siklik, sementara elemen non-sekering berupa kolom dan balok dirancang harus dapat bertahan tetap elastik.



Gambar 36 Sistem rangka berpengaku konsentris [19] dan [27], (a) sistem struktur, (b) deformasi struktur, (c) kurva histeresis

5.3.2 Sistem Rangka Berpengaku Tahan Tekuk

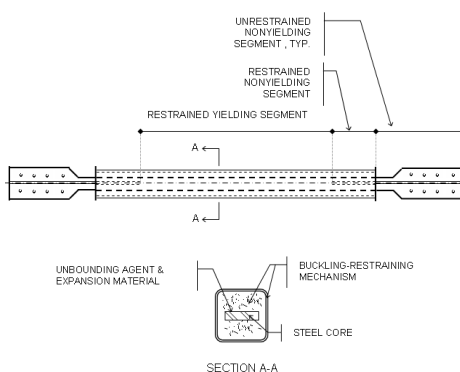
Sistem ini merupakan pengembangan dari sistem rangka berpengaku konsentris dengan menambahkan selubung berisi mortar pada elemen baja

pengaku diagonal sedemikian sehingga tidak mengalami tekuk, tetapi mengalami leleh pada saat menerima gaya tekan maupun gaya tarik akibat gempa besar (**Gambar 37**). Disipasi energi yang efektif dan stabil akan terjadi melalui **kerusakan terkendali** pada elemen baja yang leleh selama mengalami beban siklik akibat gempa, sementara elemen struktur lainnya (kolom dan balok) tetap elastik dan menghasilkan **struktur bangunan tangguh** yang secara keseluruhan mampu memikul gaya gempa yang besar.

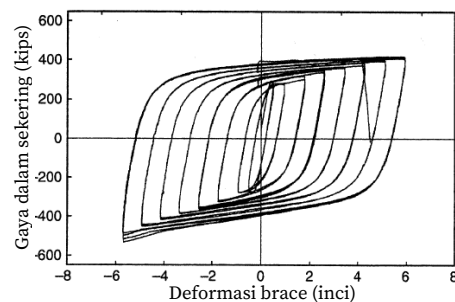
Elemen sekering baja tahan tekuk sebagai pendisipasi energi akibat beban gempa terbukti juga sangat efektif digunakan dalam perkuatan struktur yang telah berdiri, baik struktur baja maupun struktur beton bertulang. Penambahan elemen ini dapat dilakukan dengan relatif mudah pada balok atau kolom dari struktur yang telah berdiri, dengan menggunakan sambungan baut/angkur.



(a)



(b)



(c)

Gambar 37 Sistem rangka berpengaku tahan tekuk [19, 27], (a) sistem struktur, (b) elemen sekering, (c) kurva histeresis

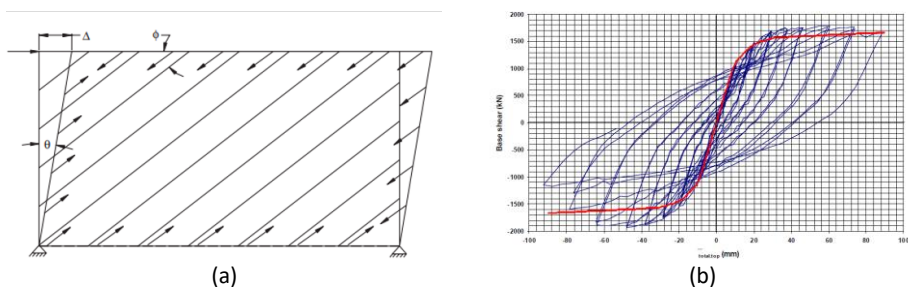
5.3.3 Sistem Dinding Geser Pelat Khusus

Sistem Dinding Geser Pelat Khusus (*Steel Plate Shear Wall-SPSW*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 38** dirancang mampu berdeformasi inelastik signifikan selama pembebanan siklik akibat gempa melalui pelelehan pelat dinding (elemen sekering) secara efektif dan stabil, sedangkan elemen lainnya (non-sekering) dirancang lebih kuat daripada pelat yang mengalami pelelehan dan *strain hardening*. Pelelehan pelat dinding terjadi setelah pelat dinding menekuk dan menghadirkan aksi tegangan tarik yang besar dalam arah diagonal dinding.



Gambar 38 Sistem dinding geser pelat khusus [19]

Pemodelan struktur dilakukan dengan membagi pelat menjadi elemen-elemen tarik dalam arah diagonal namun tidak memikul gaya pada saat tertekan (**Gambar 39a**). Kerusakan yang terkendali berupa pelelehan dan tekuk pelat yang terjadi pada arah bergantian akibat pembebanan siklik, akan menghasilkan disipasi energi yang cukup besar (**Gambar 39b**), sedemikian sehingga perancangan ukuran ketebalan dinding pelat (sebagai elemen sekering) dapat dilakukan dengan menggunakan nilai R dan C_d yang cukup besar, $R=7$, dan $C_d=6$, seperti yang ditentukan dalam SNI 7860-2020.

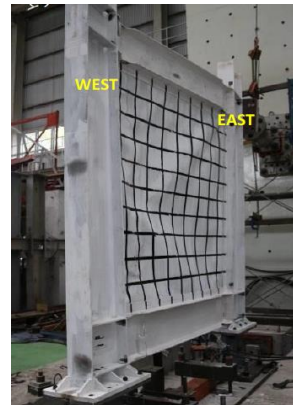


Gambar 39 Pemodelan elemen tarik dan disipasi energi pada SPSW (a) elemen tarik (b) kurva histeresis [19, 27]

Penelitian yang dilakukan terhadap SPSW menunjukkan pentingnya merancang sistem sambungan balok-kolom yang mampu menghadapi besarnya momen lentur yang akan dipikul oleh balok maupun kolom [28]



(a)



(b)

Gambar 40 Kerusakan pada sistem dinding geser pelat khusus akibat beban siklik (a) sebelum pembebanan, (b) setelah pembebanan [28]

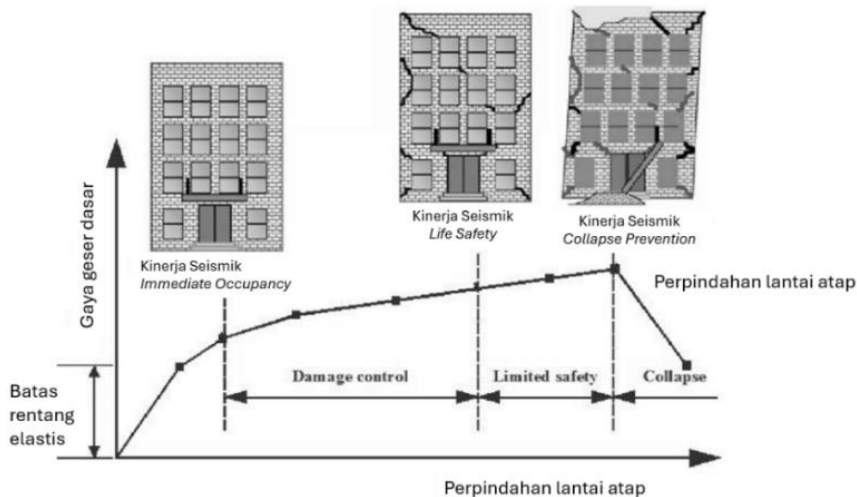
6 PENGEMBANGAN LANJUT STRUKTUR BAJA PEMIKUL GEMPA

6.1 PERANCANGAN DAN EVALUASI STRUKTUR BERBASIS KINERJA

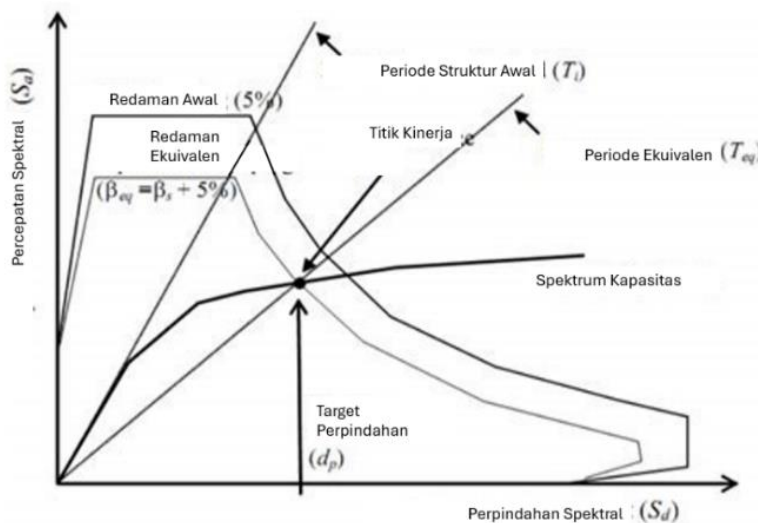
Kemajuan yang telah berlangsung dalam komputasi numerik yang didukung oleh pengembangan perangkat keras maupun lunak dalam analisis non-liner terhadap struktur akibat pembebanan dinamik berupa analisis riwayat waktu, memungkinkan analisis struktur dan evaluasi respons struktur akibat beban gempa dilakukan terhadap struktur dengan karakteristik bahan dan sistem struktur yang dimodelkan sedekat mungkin dengan kondisi struktur yang akan maupun sudah terbangun. Dengan demikian, struktur dan elemen-elemennya tidak lagi dirancang berdasarkan ketentuan dalam standar perancangan dengan berbagai asumsi pemodelan, namun berdasarkan kinerja struktur yang diinginkan dan dirumuskan berdasarkan kondisi kegempaan dan pemodelan perilaku struktur yang lebih akurat, yaitu dengan menggunakan nilai parameter-parameter bahan dan model respons pembebanan yang lebih akurat untuk setiap jenis penampang dan elemen struktur pada berbagai sistem struktur baja pemikul gempa. Perancangan struktur ini lebih dikenal dengan perancangan struktur tahan gempa berbasis kinerja (*Performance Based Seismic Design*), yaitu dengan menentukan terlebih dahulu kinerja struktur yang diinginkan, dan kondisi kerusakan struktur yang dapat diterima, sebagai dasar perancangan (**Gambar 41**). Dengan menggunakan analisis non-linier, kondisi kerusakan struktur diperiksa terhadap bekerjanya beban gempa rencana dan akibat beban gempa maksimum yang dipertimbangkan dengan risiko tertarget seperti ditunjukkan pada **Gambar 43**. Kinerja struktur diperiksa juga terhadap sejumlah data rekaman (percepatan) gempa yang telah diskalakan terhadap kondisi kegempaan di lokasi bangunan yang dievaluasi.

Kemampuan mengevaluasi kinerja struktur yang direncanakan tentunya dapat digunakan juga untuk mengevaluasi kinerja struktur eksisting, yang sudah terbangun, hal mana menjadi sangat bermanfaat dalam melakukan *retrofitting* yang diperlukan oleh struktur yang diragukan kinerjanya akibat kerusakan yang pernah dialami. Penelitian yang cukup intensif dan ekstensif telah menghasilkan pedoman evaluasi dan *retrofitting* struktur baja eksisting

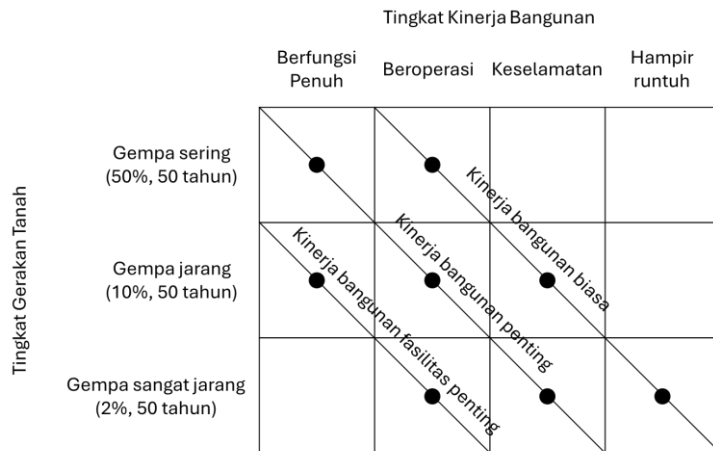
[29, 30, 31] yang selanjutnya dapat digunakan untuk secara lebih akurat merancang struktur bangunan baja yang baru maupun untuk secara lebih akurat mengevaluasi dan meningkatkan ketahanan struktur baja eksisting (termasuk yang telah mengalami kerusakan) terhadap bahaya gempa yang tidak dapat ditentukan secara pasti besar dan waktu kejadiannya.



Gambar 41 Kondisi kerusakan struktur dan tingkat kinerja yang diinginkan [32]



Gambar 42 Evaluasi kinerja struktur akibat pembebanan gempa [33]



Gambar 43 Matriks Perancangan Struktur Berbasis Kinerja [34]

6.2 RESILIENT AND SUSTAINABLE STRUCTURES

Keberhasilan perancangan struktur baja tahan gempa melalui kinerja elemen sekering yang direncanakan rusak untuk mendisipasi energi, membuka wawasan untuk meningkatkan ketahanan struktur terhadap bahaya pembebanan yang ekstrem baik akibat beban statik maupun dinamik, termasuk bahaya gempa yang tidak terduga besar dan waktu kejadiannya, dan pada saat yang sama menghasilkan struktur yang ekonomis dan tangguh setelah gempa yang berulang kali terjadi. Selanjutnya berkembang pula upaya untuk mengendalikan kerusakan (*damage control*) serta upaya perbaikan yang cepat setelah terjadinya gempa (*rapid post-earthquake repair*).

Kerusakan akibat gempa akan dapat dimitigasi dengan merancang elemen sekering yang dapat diganti, dalam hal ini melalui sambungan baut yang mudah dilepas dan dipasang. Besar kemungkinan bahwa pada saat gempa berakhir, kondisi struktur tidak kembali pada posisi semula karena terkendala oleh elemen daktail yang telah rusak karena mengalami deformasi inelastis. Namun, mengingat elemen non-sekering lainnya dirancang tetap elastik dan tidak mengalami leleh, maka penggantian elemen daktail yang rusak dengan elemen daktail yang baru akan mengembalikan posisi struktur secara keseluruhan ke kondisi semula sebelum mengalami gempa.

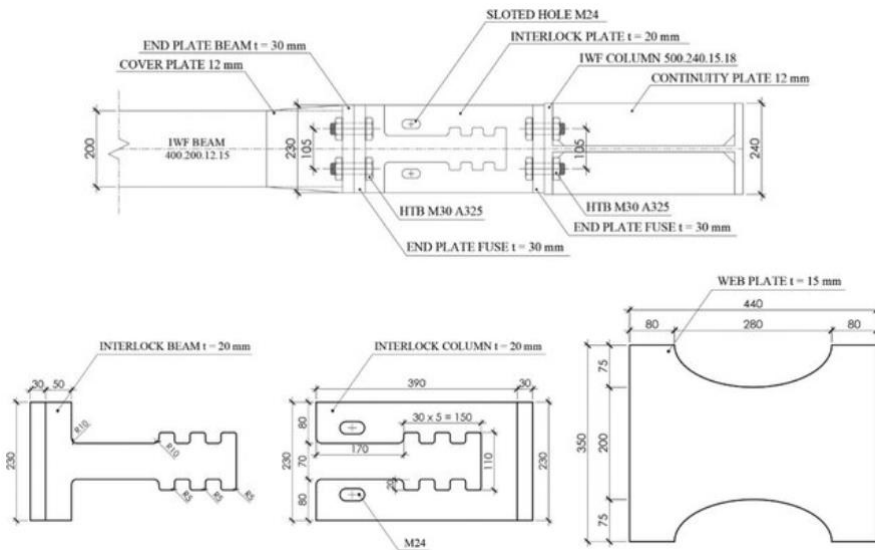
Penggunaan link geser yang rusak dan dapat diganti pada sistem rangka berpengaku eksentris dapat juga dilakukan pada sistem struktur pemikul gempa lainnya, seperti sistem *core* rangka baja dan sistem dinding geser beton

bertulang (**Gambar 44**). Penelitian yang dilakukan pada kedua sistem struktur tersebut [35, 36, 37] menunjukkan penggunaan link yang rusak akibat pembebanan siklik, dapat diganti dengan mudah pada posisi pelat penyambung link ke balok perangkai tidak mengalami kerusakan sama sekali sesuai hasil perancangan. Hal ini akan meningkatkan ketahanan struktur bangunan tinggi dengan meminimalkan beban perbaikan dan kerugian lainnya yang mungkin ditimbulkan akibat gempa besar yang sering terjadi. Penelitian mengenai link sebagai elemen sekering yang akan **mengalami kerusakan** (leleh) pada struktur *core* bangunan tinggi juga dilakukan beberapa peneliti lainnya [38, 39, 40] dalam upaya menghasilkan **struktur pemikul gempa yang tangguh**, *resilient* dan *sustainable*.



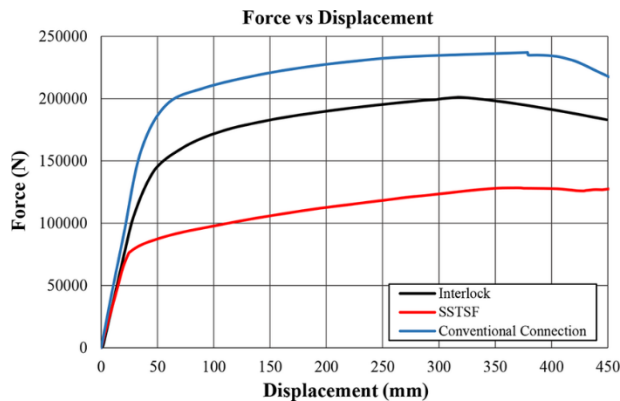
Gambar 44 Pengujian link yang dapat diganti pada struktur *core* bangunan tinggi [35, 37]

Selain penelitian terhadap kinerja elemen sekering berupa link-geser yang dapat diganti pada sistem struktur rangka baja berpengaku eksentris, saat ini Penulis bersama kandidat di Program Doktor Teknik Sipil ITB mengembangkan **sistem sambungan yang dapat diganti** sebagai pendisipasi energi pada sistem struktur rangka pemikul momen seperti ditunjukan pada **Gambar 45**. Hal ini dimaksudkan untuk menghasilkan struktur yang tangguh, *resilient* dan *sustainable* dibandingkan dengan sistem rangka pemikul momen konvensional, yang selain akan mengorbankan balok-balok baja dalam ukuran besar juga akan mengalami kesulitan saat menggantinya setelah bangunan mengalami gempa di daerah yang sering mengalami gempa besar.



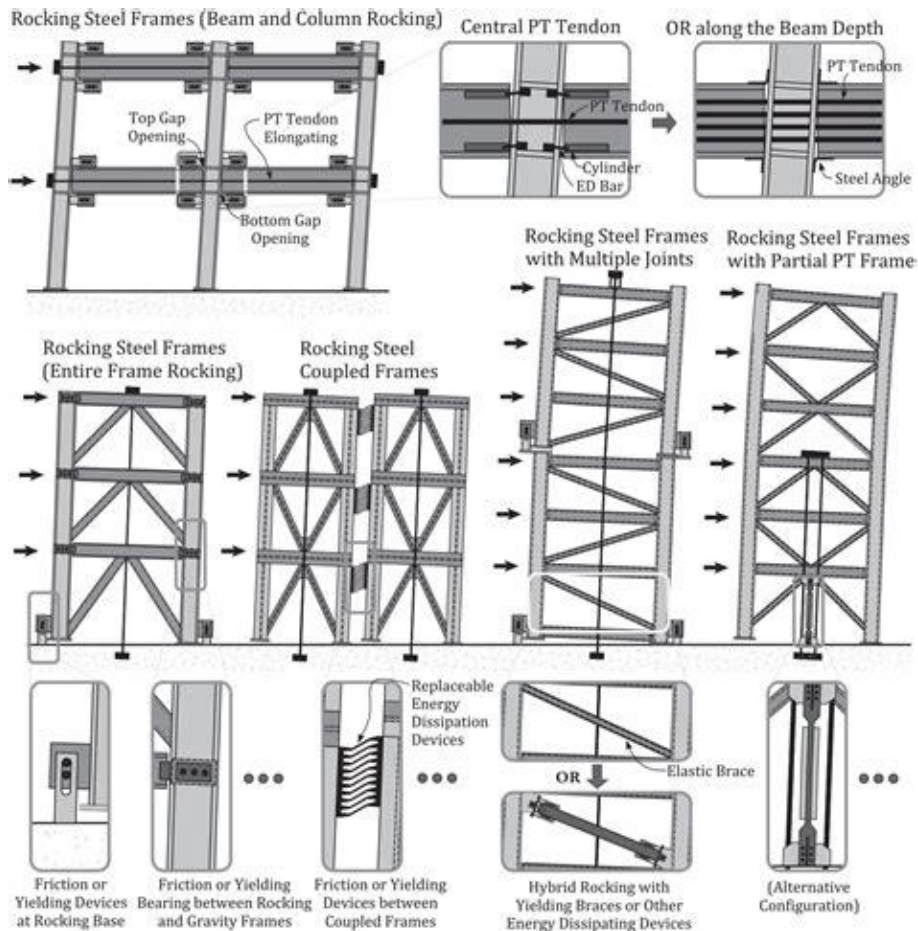
Gambar 45 Sistem sambungan yang dapat diganti dengan mekanisme kunci [41]

Pada sistem rangka pemikul momen ini, kerusakan direncanakan terjadi secara terpusat pada bagian pelat sambungan sebagai elemen sekering yang mengalami tarik dan tekan secara bergantian akibat momen yang bekerja bolak-balik pada sistem rangka yang menerima beban siklik lateral. Hasil kajian numerik menunjukkan kinerja sambungan yang cukup baik untuk dapat digunakan pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus, seperti ditunjukkan pada **Gambar 46**. Kerusakan berupa kelelahan hanya terjadi pada segmen tarik-tekan tanpa disertai leleh di ujung balok. Kajian eksperimental yang sedang dilakukan diharapkan akan memverifikasi perilaku sistem sambungan ini.



Gambar 46 Hasil kajian numerik beban siklik pada sistem sambungan dengan kunci (*interlock*) [41]

Struktur yang dirancang mengalami kelelahan pada elemen sekering akibat pembebanan lateral siklik, juga dirancang untuk dapat kembali pada posisi semula setelah pembebanan siklik berakhir. Kerusakan yang timbul akibat lelehnya elemen sekering pada pembebanan ke satu arah, dapat ‘dihilangkan’ dengan kerusakan berikutnya yang berupa deformasi inelastis akibat pembebanan siklik dalam arah kebalikan, seperti yang terjadi pada saat terjadinya gempa. Selain melalui mekanisme penggantian elemen sekering yang rusak setelah gempa berakhir, pengembangan struktur baja yang tangguh di daerah rawan gempa dilakukan pula dengan merancang mekanisme *self-centering*, yaitu merancang interaksi di antara elemen-elemen sekering dan non-sekering pada struktur sedemikian sehingga pada setiap akhir pembebanan akibat gempa, posisi struktur dapat kembali pada posisi semula. **Gambar 47** menunjukkan beberapa sistem struktur dengan mekanisme *self-centering*, termasuk sistem yang merancang kerusakan (kelelahan) pada elemen sekering [42, 43, 44].



Gambar 47 Sistem struktur dengan mekanisme *self-centering* [44, 45]

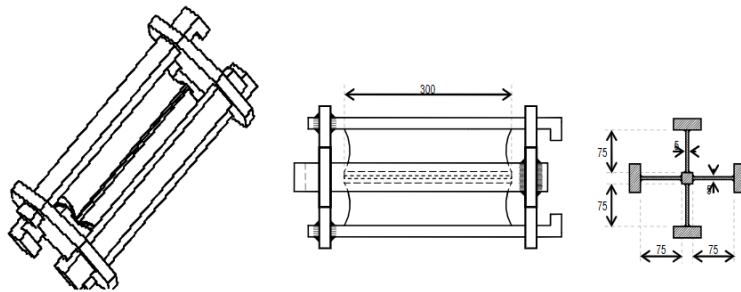
Dalam menghadapi kondisi struktur eksisting dengan kinerja yang ‘kurang baik’ terhadap bahaya gempa, baik sebelum maupun setelah kejadian gempa, telah dikembangkan upaya *retrofitting* dan perkuatan struktur, antara lain dengan menambahkan elemen sekering pada struktur yang telah berdiri. Penggunaan bresing anti-tebuk, merupakan metode yang telah terbukti sangat efektif untuk meningkatkan kinerja struktur baja maupun struktur beton bertulang dengan secara relatif mudah memasangkannya ke portal rangka eksisting untuk meningkatkan kekakuan, kekuatan maupun kemampuan mendisipasi energi melalui kelelahan inti bresing yang terkendali pada saat gempa besar terjadi.

6.3 AGENDA KK REKAYASA STRUKTUR FTSL ITB

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur FTSL ITB secara konsisten dan berkelanjutan mengagendakan dan melakukan pengembangan struktur bangunan yang berkinerja tinggi terutama dalam menghadapi berbagai bahaya bencana, di antaranya pengembangan struktur bangunan tahan gempa. Saat ini Perancangan Struktur Berbasis Kinerja menjadi tema kegiatan pengembangan, yang meliputi aspek pengembangan material, perumusan beban gempa, analisis dinamis, komputasi, dan desain struktur tahan gempa.

Dalam pengembangan struktur baja tahan gempa, telah dilakukan sejumlah penelitian yang dilakukan oleh para dosen di Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur dan mahasiswa Program Magister dan Doktor Pengutamaan Rekayasa Struktur FTSL ITB. Penelitian antara lain mengkaji parameter seismik bahan baja Indonesia [26], pengembangan link pada struktur rangka baja berpengaku eksentris [28], pemanfaatan link geser yang dapat diganti (*replaceable link*) pada struktur *core* bangunan tinggi [35, 36, 37], elemen pendisipasi energi gempa [46, 47, 48, 49], sambungan link geser [50], dan sejumlah kajian numerik tentang perilaku berbagai struktur baja pemikul gempa untuk bangunan tinggi, antara lain mengenai penggunaan elemen bresing tahan tekuk pemikul beban gempa [51] dan efektivitas berbagai kombinasi struktur rangka baja tahan gempa [52, 53]. Juga telah dikembangkan elemen pendisipasi energi yang telah dipatenkan, yaitu Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial (*Uniaxial Seismic Energy Dissipater* - USED) - [54]. Pada elemen ini, kerusakan direncanakan pada pelat-pelat yang mengalami kelelahan geser bolak-balik secara efektif akibat gaya tarik dan tekan pada bresing atau pengaku diagonal yang dipasang pada rangka struktur.

Rangkaian penelitian yang sedang dilakukan mengenai parameter baja konstruksi Indonesia, sambungan pendisipasi energi pada rangka pemikul momen [41], dan perilaku sambungan seismik balok-kolom menggunakan baja mutu tinggi, dan beberapa topik penelitian lainnya diharapkan dapat menunjang pengembangan struktur rangka seismik pemikul momen yang tangguh. Demikian pula penelitian mengenai sistem struktur pemikul gempa lainnya, termasuk modifikasi sistem struktur dengan berbagai elemen dan sistem redaman.



Gambar 48 Alat pelepas energi gempa [47]

Dalam mendukung agenda pengembangan struktur baja tahan gempa di ITB, telah dilakukan kerja sama penelitian yang melibatkan pihak dalam dan luar negeri, di antaranya Nippon Steel and Sumitomo Metal, Nippon Steel Engineering, serta Tokyo Institute of Technology. Hal ini didukung pula dengan penyelenggaraan Joint Seminar bersama Japan Society of Steel Construction (JSSC) tahun 2012 dan Japan Society of Isolation (JSI) tahun 2017, kerjasama dan Seminar Nasional yang diadakan Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI), Asosiasi Ahli Rekayasa Kegempaan Indonesia (AARGI), dan Indonesian Society of Steel Construction (ISSC); serta kerjasama dengan industri konstruksi baja di Indonesia.

PENUTUP

Pembangunan infrastruktur yang tahan terhadap bahaya gempa merupakan kebutuhan mendasar yang harus dipenuhi di sebagian besar wilayah Indonesia yang rawan gempa. Kemampuan elemen struktur baja untuk berdeformasi cukup besar (dan mengalami rusak) tanpa mengalami penurunan kekuatan yang signifikan, telah mendorong munculnya berbagai sistem struktur baja pemikul gempa, melalui mekanisme kelelahan dan pendisipasian energi yang terkendali pada elemen yang rusak tanpa menyebabkan keruntuhan bangunan. Selanjutnya, telah dikembangkan pula elemen struktur baja pendisipasi energi yang mudah diganti setelah kejadian gempa, yang sangat mendukung pengembangan struktur yang tangguh (*resilient* dan *sustainable*) di daerah yang sering mengalami gempa.

Peningkatan produksi bahan baja dalam negeri dan tersedianya tenaga pelaksana yang kompeten serta teknologi konstruksi baja yang telah berkembang di Indonesia saat ini, telah meningkatkan volume pembangunan struktur baja di Indonesia selama 20 tahun terakhir. Seiring dengan berkembangnya strategi memodifikasi struktur dengan mekanisme redaman yang efektif (yang hingga saat ini masih merupakan opsi yang membutuhkan biaya investasi yang relatif lebih besar); alternatif strategi penggunaan elemen sekering yang dapat diganti masih merupakan alternatif sistem struktur tahan gempa yang realistis dalam beberapa waktu mendatang bagi sebagian besar wilayah Indonesia yang rawan gempa.

Kerja sama penelitian antara ITB dengan berbagai pelaku industri konstruksi baja di Indonesia telah dan akan dikembangkan sebagai bagian strategis dari upaya menyeluruh yang dibutuhkan bagi pembangunan infrastruktur tahan gempa di Indonesia, baik dalam merancang bangunan baru maupun mengevaluasi dan melakukan rehabilitasi seismik (*retrofitting*) terhadap bangunan baja yang telah berdiri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memanjatkan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Kasih yang telah menyertai dan memberkati sepanjang perjalanan hidup Penulis, dan saat ini memberi amanah kepada Penulis sebagai Guru Besar di ITB. Selanjutnya Penulis memohon pimpinan dan kekuatannya dalam mengemban amanah kegurubesaran ini dengan sebaik-baiknya.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan, Forum Guru Besar, Senat Akademik, beserta para sejawat dosen dan tenaga kependidikan Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan dukungan dan kepercayaan selama Penulis mengemban tugas di kampus tercinta ini. Secara khusus Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan dan kerjasama dari Dekanat, Senat beserta sejawat dosen dan tenaga kependidikan FTSL ITB, khususnya sejawat di Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, yang dengan semangat kekeluargaan memberikan perhatian, kesempatan, kerja sama dan dukungan yang tulus kepada Penulis di saat menghadapi berbagai tantangan dalam menjalankan tugas. Ucapan terima kasih disampaikan kepada para Guru Besar yang telah memberikan dukungan dan rekomendasi atas pengusulan Penulis sebagai Guru Besar ITB, khususnya kepada Prof. Iswandi Imran yang berkenan meluangkan waktu, menelaah, dan memberi masukan yang sangat berharga dalam penulisan buku orasi ini.

Penulis berterima kasih kepada para sejawat dalam dunia pendidikan tinggi dan profesi teknik sipil, yang juga turut membentuk sosok Penulis di bidang pendidikan dan profesi hingga saat ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para mahasiswa, khususnya bimbingan Program Magister dan Program Doktor dan para teknisi laboratorium yang telah mendukung berbagai penelitian dan publikasi yang telah dihasilkan Penulis selama ini.

Penulis sangat bersyukur atas keteladanan kedua orang tua yang telah menginspirasi penulisan buku orasi ini, sebagai bagian dari pengabdian di dalam dunia pendidikan guna mempersiapkan generasi penerus bangsa khususnya dalam menghadapi tantangan dan dinamika perubahan.

Penulis terutama berterima kasih kepada istri tercinta bersama kedua anak dan keluarganya, yang dengan doa dan kesabarannya mendukung pengusulan Guru Besar dan penulisan buku orasi ini agar memberi manfaat sebesar-besarnya bagi kemajuan pendidikan dan dunia konstruksi baja di Indonesia.-

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN), "Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Republik Indonesia, Jakarta, 2017.
- [2] N. M. Newmark and W. J. Hall, *Earthquake Spectra and Design*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [3] N. M. Newmark and W. J. Hall, *Seismic Design Criteria for Structures, Equipment, and Facilities*, Champaign: University of Illinois Champaign-Urbana, 1969.
- [4] Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI 1726:2019 - Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung," Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, 2019.
- [5] S. Sutjipto and I. Sumeru, "Spektrum Respons Desain RSNI 1726:2018 Berdasarkan Peta Gempa Indonesia 2017," Jakarta, 2018.
- [6] G. W. Housner, "Behavior of Structures during Earthquakes," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, pp. 109-129, 1959.
- [7] A. S. Veletsos and N. M. Newmark, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions," in *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 1960.
- [8] S. Thusoo and R. Kumar, "Slideshare," 17 November 2016. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/slideshow/earthquake-resistant-techniques-69173884/69173884>. [Accessed 2025].
- [9] Inspired Pencil, "Plastic Hinge in Beam," 2021. [Online]. Available: <https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/plastic-hinge-in-beam>. [Accessed 2025].
- [10] A. H. Ragoonwala, S. Paul and S. K. Deb, "Numerical Simulation of Speciam Moment Resisting Frame with Reduced Beam Section under Cyclic Load," in *17th Symposium on Earthquake Engineering*, Singapore, 2023.
- [11] The Engineering Community, "What is base isolation for structure?," 7 November 2019. [Online]. Available:

<https://www.theengineeringcommunity.org/what-is-base-isolation-for-a-structure/>. [Accessed 2025].

- [12] A. B. Shahabi, G. Z. Ahari and M. Barghian, "Base Isolation Systems - A State of Art Review According to Their Mechanism," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 37-61, 2020.
- [13] M. Moestopo, I. Imran, D. M. Siringoringo, J. Michael, E. Lim and S. Yamazaki, "Seismic Design and Performance Evaluation of Typical Lightweight and Heavyweight RC Girders Bridges with Friction Pendulum Bearing in Indonesia," *Structures*, vol. 46, pp. 1154-1170, 2022.
- [14] K. Cheraghi, M. T. Roudsari, S. Kiasat and J. Esfandiari, "Numerical and Analytical Study of the Cyclic Behavior of ADAS Damper and the Effect of Axial Force on its Behavior," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 28, no. 13, pp. 3706-3723, 2024.
- [15] C. G. Salmon and J. E. Johnson, *Steel Structures: Design and Behavior*, Fourth Edition, Upper Saddle River: Harper Collins College, 1997.
- [16] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "FEMA 451 - NEHRP Recommended Provisions: Design Examples," Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2006.
- [17] Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI 7860:2020 - Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural," Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, 2020.
- [18] American Institute of Steel Construction (AISC), "AISC 341 - Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016.
- [19] M. D. Engelhardt, "TA: Teaching the Principles of Seismic-Resistant Design of Steel Building Structures," December 2024. [Online]. Available: <https://www.aisc.org/education/university-programs/ta-teaching-the-principles-of-seismic-resistant-design-of-steel-building-structures/>.
- [20] M. Moestopo, "On Improved Behavior of Seismic Resistant Steel Braced Frames," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2003.
- [21] European Commission, "INNOSEIS: Valorization of Innovative Anti-Seismic Devices - Work Package 3, Deliverable 3.1: Borders between EN 15129 and EN 1998-1 on Dissipative Devices," European Commission, 2016.

- [22] American Institute of Steel Construction (AISC), AISC 358 - Prequalified Connections for SMF and IMF with Supplement, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [23] Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI 7972:2020 - Sambungan Terprakualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik," Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, 2020.
- [24] K. Kasai and E. P. Popov, "Cyclic Web Buckling Control for Shear Link Beams," *Journal of Structural Engineering*, pp. 505-523, 1986.
- [25] M. Moestopo, Y. Heriansyah and B. N. Batubara, "Kajian Kinerja Link yang Dapat Diganti pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik tipe Splik K," in *Seminar Haki*, Jakarta, 2009.
- [26] M. Moestopo and V. C. Simanjuntak, "Kuat Lebih Baja Indonesia untuk Struktur Baja Tahan Gempa," in *Seminar dan Pameran HAKI*, 2012.
- [27] M. Bruneau, C.-M. Uang and R. Sabelli, *Ductile Design of Steel Structures*, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [28] M. Moestopo and R. Purba, "Large Scale Experimental Investigation of Special Moment Resisting Connections in Steel Plate Shear Walls," in *17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE)*, Sendai, Japan, 2020.
- [29] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "FEMA 351 - Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment Frame Buildings," Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [30] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "FEMA 356 - Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings," Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [31] American Institute of Steel Construction (AISC), "AISC 342 - Seismic Provisions for Evaluation and Retrofit of Existing Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.
- [32] A. Abd-Elhamed and S. Mahmoud, "Nonlinear Static Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings: A Case Study in Cairo Earthquake," *Journal of Engineering Research*, vol. 4, no. 1, pp. 1-23, 2016.

- [33] Applied Technology Council (ATC), "ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," Applied Technology Council, Redwood City, 1996.
- [34] Structural Engineers Association of California (SEAOC), "Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Vols. I and II: Conceptual Framework," Structural Engineers Association of California, Sacramento, 2000.
- [35] M. Moestopo, I. Rama and I. N. Rachma, "Kajian Numerik dan Eksperimental pada Struktur Core Rangka Baja dengan Balok Perangkai dan Link yang Dapat Diganti," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 29, no. 1, pp. 25-26, 2022.
- [36] M. Moestopo, D. Kusumastuti and Kurniawan, "Experimental Study on Replaceable Shear Link on Reinforced Concrete Shear Wall," in *IOP Conferece Series: Earth and Environmental Science*, 2023.
- [37] M. Moestopo, D. Kusumastuti, E. Lim, U. Akbar and M. S. Ramadhita, "Experimental Study on the Seismic Behavior of Replaceable Shear Links Connected to Coupling Beam," *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information*, vol. 8, no. 2, pp. 532-539, 2018.
- [38] X. Ji, D. Liu, Y. Sun and C. M. Hutt, "Seismic Performance Assessment of a Hybrid Coupled Wall System with Replaceable Steel Coupling Beams versus Traditional RC Coupling Beams," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 46, no. 4, pp. 517-535, 2017.
- [39] X. Ji, Y. Wang, Q. Ma and T. Okazaki, "Cyclic Behavior of Replaceable Steel Coupling Beams," *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. 2, 2017.
- [40] J. D. Prasetyo, "Studi Numerik Penerapan Link yang Dapat Diganti pada Bangunan Beton Bertulang 15 Lantai dengan Dinding Kopel," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2021.
- [41] P. S. Yuana, M. Moestopo and D. Kusumastuti, "Improving the Seismic Performance of Steel Moment Connections Using an Interlock Mechanism as a Replaceable Fuse Element: Numerical Analysis," *Asian J Civ Eng*, 2025.
- [42] Y. Zhang, Y. Wang and H. Li, "Seismic Performance Evaluation of a Novel Resilient Steel Frame with Self-Centering Rocking Columns and

- Replaceable Energy Dissipation Devices," *Engineering Structures*, vol. 288, 2024.
- [43] Y. Wang, Y. Xie, Z. Zhou and Q. Xie, "Seismic Analysis and Design of General Self-Centering Braced Frames Under Near Fault Pulse Type Ground Motions," *Journal of Building Engineering*, vol. 96, 2024.
- [44] G. Xu, T. Guo, A. Li, T. Zhou and C. Shuang, "Seismic Performance of Steel Frame Structures with Novel Self-Centering Beams: Shaking-table test and Numerical Analysis," *Journal of Structural Engineering*, vol. 151, no. 3, 2025.
- [45] C. Zhong and C. Christopoulos, "Self-centering Seismic Resistant Structures: Historical Overview and State of the Art," *Earthquake Spectra*, vol. 38, no. 2, pp. 1321-1356, 2022.
- [46] N. Pratiwi, M. Moestopo and D. Kusumastuti, "Investigation on Behaviour and Performance of Replaceable Inverted Y Dissipation Device in Eccentric Braced Frame Steel Structures," *Asian J Civ Eng*, vol. 25, pp. 2579-2586, 2024.
- [47] S. P. Mangkoesoebroto, "Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 20, no. 1, pp. 11-22, 2013.
- [48] J. Utomo, M. Moestopo, A. Surahman and D. Kusumastuti, "Estimating the Ultimate Energy Dissipation Capacity of Steel Pipe Dampers," *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 1101-1107, 2015.
- [49] J. Utomo, M. Moestopo, A. Surahman and D. Kusumastuti, "Combined Rings and Horizontal Steel Pipe as Hysteretic Dampers," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019.
- [50] M. Moestopo, D. Kusumastuti and S. Wibowo, "Numerical Study on Connections of Replaceable Shear Links with Inserted Pins," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022.
- [51] R. D. Andarini and M. Moestopo, "Kajian Eksperimental Bresing Tahan Tekuk pada Bangunan Tahan Gempa di Indonesia," *Jurnal Teknik Sipil ITB*, vol. 20, no. 3, pp. 207-216, 2013.
- [52] K. T. Menzelthe, "Studi Parametrik Kinerja Struktur Sistem Tunggal BRBF dan Sistem Ganda SMF-BRBF," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2022.

- [53] A. R. Pratama, "Studi Parametrik Kinerja Struktur Sistem Tunggal SPSW dan Sistem Ganda SMF-SPSW," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2023.
- [54] K. H. d. H. A. M. R. Indonesia, "Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial". Indonesia Patent IDP000061434, Agustus 2019.
- [55] D. Vian, Y. C. Lin, M. Bruneau and K. C. Tsai, "Cyclic Performance of Low Yield Strength Steel Panel Shear Walls," in *6th KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Korea, 2003.

CURRICULUM VITAE



Nama : R. Muslinang Moestopo
Tempat, tgl lahir : Bandung, 18 Agustus 1962
Kelompok Keahlian : Rekayasa Struktur
Alamat Kantor : Gedung CIBE Lantai 4
Jl. Ganesha 10 Bandung
Nama Istri : Endang Sulistyorini
Nama Anak : Wimanda Muslinang Moestopo
Widianto Putra Moestopo

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sekolah Dasar Prof. Dr. Moestopo, Bandung, 1973.
2. Sekolah Menengah Pertama Kristen I Bahureksa, Bandung, 1976.
3. Sekolah Menengah Atas Kristen Dago, Bandung, 1980.
4. Institut Teknologi Bandung, Sarjana, Teknik Sipil, 1985.
5. University of Wisconsin – Madison, Master of Science in Engineering Mechanics, 1989.
6. University of Wisconsin – Madison, Doctor of Philosophy, 1994.
7. Institut Teknologi Bandung - Program Profesi Insinyur, 2020

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Staf Teknis Proyek Pengembangan, 1998-2001.
2. Project Officer ITB Development Project – JBIC Loan IP-434, 2001.
3. Pemimpin Proyek Pengembangan, 2002-2003.
4. Project Director ITB Development Project – JBIC Loan IP-434, 2002-2003.
5. Kepala Unit Urusan Logistik, 2003-2004.
6. Asisten Direktur Perencanaan, 2004.
7. Staf Ahli Wakil Rektor Bidang Perencanaan, 2005-2009.
8. Ketua Laboratorium Mekanika Struktur PAU-IR, 2005 – 2010.
9. Wakil Dekan Bidang Akademik FTSL, 2010.
10. Ketua Laboratorium Struktur Bangunan PRI, 2010 – 2024.

11. Kepala Unit Implementasi Proyek Pengembangan ITB, JICA Loan IP-553, 2011 – 2016.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Calon PNS, 1 Maret 1987.
2. Penata Muda, III/a, 1 April 1988.
3. Penata Muda Tk.I, III/b, 1 Oktober 1996.
4. Penata, III/c, 1 Oktober 1998.
5. Penata Tk.I, III/d, 1 April 2003.
6. Pembina, IV/a, 1 Oktober 2005.
7. Pembina Tk.I, IV/b, 3 April 2024.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya, 1 April 1988.
2. Asisten Ahli, 1 Desember 1995.
3. Lektor Muda, 1 Juli 1998.
4. Lektor Madya, 1 Januari 2001
5. Lektor Kepala, 1 Agustus 2005.
6. Guru Besar, 1 September 2024.

V. KEGIATAN PENELITIAN (Dalam 20 Tahun Terakhir)

1. **M. Moestopo**, D. Kusumastuti. *Pengembangan Komponen Pendisipasi Energi Pada Struktur Tahan Gempa*; Ditjen Dikti; Penelitian Desentralisasi 2014-15. Bandung.
2. **M. Moestopo**, D. Kusumastuti, E.Lim. *Application of Seismic Devices for Core Frames of High-rise Buildings*; AUN/SEED-Net JICA dan Nippon Steel & Sumitomo Metal; Collaboration Research with Industry 2015-17; Bandung-Tokyo.
3. R. Purba, **M. Moestopo**; *Optimalisasi Kinerja Dinding Geser Pelat Baja Sebagai Sistem pemikul beban Gempa*; Ditjen Dikti; Program Post Doktoral Dikti 2017-18. Bandar Lampung – Bandung.
4. **M. Moestopo**, D. Kusumastuti; *Kajian Lanjut Kinerja Seismik Balok Perangkai dan Link pada Bangunan Tinggi*; Ditjen Dikti; Penelitian Desentralisasi 2019-20; Jakarta.
5. R. Purba, **M. Moestopo**, H. Riyanto, H. Muwardi, S. Haris; *Dinding Geser Pelat Baja Sebagai Sistem Pemikul Beban Gempa Yang Efektif dan Ekonomis Untuk Mitigasi Kerusakan Struktur Bangunan Bertingkat*

Rendah; Ditjen Diktiristek; Penelitian Penugasan–World Class Research 2020-21; Jakarta.

6. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M., Pratiwi, N; *Pengembangan Elemen Link Vertikal sebagai Pendisipasi Energi pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentris*; Riset Unggulan ITB 2023.
7. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M., Yuana, P; *Pengembangan Sistem Sambungan Seismik Dengan Mekanisme Kunci Yang Dapat Diganti Pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen*; Riset Unggulan ITB 2024.

VI. PUBLIKASI (Dalam 20 Tahun Terakhir)

Dalam Jurnal Internasional Bereputasi

1. Yurisman, Budiono, B, **Moestopo, M.**, Suarjana, M; *Behavior of Shear Link of WF Section with Diagonal Web Stiffener of EBF Steel Structure* ITB Journal of Engineering and Technological Sciences; Vol.42 No.2, p.1-27/ 2010; ISSN: 2337-5779; Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung.
2. Kurdi, Budiono.B., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D. dan Muslih, M.R. *Residual Stress effect on link element of eccentrically braced frame*; Journal of Constructional Steel Research; 128, pp.397-404/ 2017; ISSN: 0143974X; Elsevier.
3. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Lim, E., Akbar, U., Ramadhita, M.S. *Experimental Study on the Seismic Behavior of Replaceable Shear Links Connected to Coupling Beam*; International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology; Vol. 8, No. 2/ 2018; ISSN: 2088-5334; INSIGHT - Indonesian Society for Knowledge and Human Development.
4. Purba, D., Imran, I., **Moestopo, M.**, Watanabe, A. Hikino, T., Siringoringo; *Structures with Added Buckling Restrained Brace Elements*; Electronic Journal of Structural Engineering; Volume 18-1, pp. 1-12/ 2018; ISSN: 1443-9255; *Electronic Journals for Science and Engineering -International (EJSEI)*.
5. **Moestopo, M.**, Imran, I., Siringoringo, D.M., Michael, J., Lim, E., Yamazaki, S.; *Seismic Design and Performance Evaluation of Typical Lighweight and Heavyweight RC Girders Bridges with Friction Pendulum*

- Bearing in Indonesia; Structures; Volume 46, pp.1154-1179/ 2022; ISSN: 2352-0124; Elsevier.*
6. Simanjuntak, V.C., Imran, I., **Moestopo, M.**, Setio, H.D; *The Evolution of Seismic Design Provisions in Indonesia's National Bridge Code*; ITB Journal of Engineering and Technological Sciences; Volume 54 No.6/ 2022; ISSN: 2337-5779; Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung.
 7. Simanjuntak, V.C., Imran, I., **Moestopo, M.**, Setio, H.D; *The Development of the Seismic Fragility Curve of Existing Bridges in Indonesia (Case Study: DKI Jakarta)*; Structural Monitoring and Maintenance; Volume 10 No.1 / 2023 pp.87-105.
 8. Pratiwi, N., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M.; *Investigation on the Behavior and Performance of Replaceable Inverted-Y Dissipateion Device in Eccentric Brace Frame Steel Structures*; Asian Journal of Civil Engineering; Article/10.1007/s42107-023-00929-2; Springer Nature Switzwerland AG 2023.
 9. Yuama, P.S., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M. *Improving theSeismic Performance of Steel Moment Connections using an Interlock Mechanism as a Replaceable Fuse element: Numerical Study*; Asian Journal of Civil Engineering; Article/10.1007/s42107-025-01314-x; Springer Nature Switzwerland AG 2025.

Dalam Jurnal Nasional Terakreditasi

1. Yurisman, Budiono, B., **Moestopo, M.**, Suarjana, M.; *Kajian Numerik terhadap Kinerja Link Geser dengan Pengaku Diagonal pada Struktur Rangka Baja Berpenopang Eksentrik*; Jurnal Teknik Sipil; Vol.17. No.1, 25-38/2010; ISSN: 0853-2982.
2. **Moestopo, M.** dan Pandjaitan, MAR; *Kajian Eksperimental Peningkatan Kinerja Link Geser pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik*; Jurnal Teknik Sipil; Vol.19 No.2, 93-102/2012; ISSN: 0853-2982.
3. Andarini, RD dan **Moestopo, M.**; *Kajian Eksperimental Bresing Tahan Tekuk pada Bangunan Tahan Gempa di Indonesia*; Jurnal Teknik Sipil Vol.20 No.3, 207-216/2013; ISSN: 0853-2982.
4. Kurdi, Budiono, B., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D, Muslih, M.R; *Kuantifikasi Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Daerah Pertemuan Pengaku-Badan-Sayap pada Elemen Link Struktur Rangka Baja*

- Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron*; Jurnal Teknik Sipil; Vol.23 No.1, 7-17/2016; ISSN: 0853-2982.
5. Michael,J., **Moestopo, M.**, Imran,I., Siringoringo,D.M, Lim,E.,Yamazaki,S.; *Seismic Performance of Reiforced Concrete Bridge Using Friction Pendulum Bearing*; Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering Vol.5 (2)/2022; ISSN: 25993356.
 6. **Moestopo, M.**, Indi Rama, Intan Nuriskha Rachma; *Kajian Numerik dan Ekesperimental pada Struktur Core Rangka Baja dengan Balok Perangkai dan Link yang Dapat Diganti*; Jurnal Teknik Sipil; Vol.29 No.1/2022; ISSN: 0853-2982.
 7. Yuana, P. S., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Pratiwi, N., *An Overview of Commonly Used Steel Beam-Column Connection in Indonesia for Low-Rise Building*; INTEK Jurnal Penelitian, Vol. 10 No.1, (2023), ISSN: 2615-5427.
 8. Yuana, P.S., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M. *Pengembangan Sistem Sambungan Seismik dengan Mekanisme Kunci yang Dapat Diganti pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen*; Jurnal Teknik Sipil Vol.31 No.1 1 April 2024, ISSN 0853-2982.

Dalam Prosiding Seminar Internasional

1. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Novan, A.; *Improved Performance of Bolt-connected Link Due to Cyclic Load*; The International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation; 2008; ISBN: 978-979-17551-0-8; Jakarta, Indonesia.
2. Sugihardjo, H., Merati, W., Surahman, A., **Moestopo, M.**; *Inelastic Behavior of Ductile Buckling Restraint Braced Truss-Girders Moment Frame*; The International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation; 2008; ISBN: 978-979-17551-0-8; Jakarta, Indonesia.
3. **Moestopo, M.**; *Proposed Sustainable Steel Structures in Seismic Region*; 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment; 2009; Bandung, Indonesia.
4. **Moestopo, M.**, Novan, A., Mirza, A., Panjaitan, A.R., Utomo, W.Y.; *On Improved Performance of Eccentrically Braced Frames with Replaceable Shear Link*; Proc.15th World Conference on Earthquake Engineering; 2012; ISBN: 978-1-63439-651-6; Lisboa, Portugal.

5. **Moestopo, M.**; *Seismic Resistant Design for Structural Steel Building in Indonesia*; Proc. 6th Civil Engineering Conference in Asian Region; 2013; ISBN: 978-602-8605-08-3; Jakarta, Indonesia.
6. Tudjono, Sri, DSurahman, A., Sidi, I.D., **Moestopo, M.**; *Lateral Torsional Buckling of Double Symmetrical I Beam with Vertical Stiffeners*; 4th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum; 2013; ISSN 978-979-99765-3-6; Singapore.
7. **Moestopo, M.**; *On Development of Seismic Resistant Design for Structural Steel Building in Indonesia*; Proc.10th International Conference on Urban and Earthquake Engineering; 2013; Tokyo, Japan.
8. Utomo, J., **Moestopo, M.**, Surahman, A., Kusumastuti, D.; *A Study on Simulation Models of Seismic Energy Absorbing Steel Pipes*; 7th ASEAN Conference on Civil Engineering/AUN/SEED-Net 2014; Bandung, Indonesia.
9. Utomo, J., **Moestopo, M.**, Surahman, A., Kusumastuti, D.; *Estimating the Ultimate Energy Dissipation Capacity of Steel Pipe Dampers*; Journal of Procedia Engineering; 2015; Surabaya, Indonesia.
10. Utomo, J., **Moestopo, M.**, Surahman, A., Kusumastuti, D.; *Applications of Vertical Steel Pipe Dampers For Seismic Response Reduction of Steel Moment Frames*; MATEC Web of Conferences: The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF) 2017; ISSN: 2261-236X; Seoul, South Korea.
11. Kusumastuti, D., **Moestopo, M.**, Lim, E., Akbar.U.K., Ramadhita, M.S; *Analytical Investigation of the Applicability of Seismic Devices for Core FrameSystem in High-Rise Buildings*; The Third ICCER (International Conference on Civil Engineering Research) Proceeding; 2017; ISSN: 23546026; Surabaya, Indonesia.
12. Utomo, J., **Moestopo, M.**, Surahman, A., Kusumastuti, D.; *Combined rings and horizontal steel pipe as hysteretic dampers*; IOP Science Vol 615, 012082; 2019; Stuttgart, Germany.
13. Purba, R, **Moestopo, M.**; *Large Scale Experimental Investigation of Special Moment Resisting Connections in Steel Plate Shear Walls*; Proc.17th World Conference on Earthquake Engineering; 2020; Sendai, Japan.
14. **Moestopo, M.**, Kusumastuti,D., Wibowo, S; *Numerical Study on Connections of Replaceable Shear Link with Inserted Pins* ;IOP

Conf.Series: Earth and Environmental Science;
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012040>; IOP Publishing Ltd
/ 2022

15. Pratiwi, N., Tjahjono, H.H., **Moestopo, M.**; *An Overview of the Development of Replaceable Links in Eccentrically Braced Frame Steel Structures*; Proc. 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials; 2022; ISBN: 978-981-16-7923-0; Kuching, Malaysia.
16. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Kurniawan; *Experimental Study on Replaceable Shear Link on Reinforced Concrete Shear Wall* ; IOP Conf.Series: Earth and Environmental Science;
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1244/1/012003>; IOP Publishing Ltd
/ 2023.
17. Pratiwi. N., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M; *Replaceable Inverted-Y Dissipation Device in Eccentrically Braced Frame (EBF) Steel Structures*; Proc.17th World Conference on Earthquake Engineering; Milan, Italy, 2024.
18. Zamzami, K., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Muslih, R., Syafitri, C.Z; *Residual Stress Analysis of Eccentrically Braced Frame Shear Link with End Plate*; World Conference on Earthquake Engineering; Milan, Italy, 2024.

Dalam Prosiding Seminar Nasional

1. **Moestopo, M.** dan Mirza, A.; *Kinerja Link Dengan Sambungan Baut Pada Struktur Baja Berpengaku Eksentrik*; Seminar & Pameran Teknik HAKI 2006: 979-98441-6-9; Jakarta, Indonesia.
2. **Moestopo, M.**; *Beberapa Ketentuan Baru Mengenai Desain Struktur Baja Tahan Gempa*; Seminar dan Pameran HAKI 2007, 978-979-98441-8-7; Jakarta, Indonesia.
3. **Moestopo, M.**, Herdiansah, Y., Navarro, Ben; *Kajian Kinerja Link Yang Dapat Diganti Pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik Tipe Split-K*; Seminar dan Pameran HAKI 2009 978-602-8605-01-4; Jakarta.
4. **Moestopo, M.**, Simanjuntak, V.; *Kuat Lebih Baja Indonesia Untuk Struktur Baja Tahan Gempa*; Seminar & Pameran HAKI 2012 978-602-8605-05-2; Jakarta, Indonesia.

5. Fiiandhi, M., Lewikinta, A.B., **Moestopo, M.**; *Kajian Teoritis Kinerja Sistem Struktur Baja Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726-2012*; Seminar dan Pameran HAKI 2014, 978-602-8605-09-0; Jakarta.
6. Utomo, J., **Moestopo, M.**, Surahman, A., Kusumastuti, D., Pane, I., (2014); *Prediksi Fraktur Daktail pada Pendisipasi Energi Pipa Baja dengan Pendekatan Mikromekanik*; KoNTekS 8 (Konferensi Nasional Teknik Sipil); 2014; 978-602-71432-1-0; Surakarta, Indonesia.
7. **Moestopo, M.**, Yunia, A.; *Kinerja Seismik Struktur Core Dengan Rangka Baja dan Link pada Struktur Bangunan Tinggi*; Seminar HAKI 2018; Jakarta, Indonesia.
8. Madutujuh, N., Imran, I., **Moestopo, M.**; *Preliminary Aseismic Steel and Concrete Highrise Building Design for SMRF and Dual System*; Jakarta, Indonesia.
9. **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Tenderan, R., Pratiwi, N., Yuana, P.S; *Development of Research on Seismic Resistant Steel Structures in Indonesia*; Seminar HAKI 2023; Jakarta, Indonesia.
10. Pratiwi, N., **Moestopo, M.**, Kusumastuti, D., Suarjana, M; *Pengembangan Elemen Link Vertikal Sebagai Pendisipasi Energi Pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentris*; Seminar HAKI 2023; Jakarta, Indonesia.

Penulisan Buku

Muslinang Moestopo. *Perencanaan Struktur Baja*. ISBN: 978-602-9056-11-5. Penerbit ITB Bandung, 2011.

Paten

Sindur P. Mangkoesoebroto dan Muslinang Moestopo. *Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial*. Paten No. IDP 000061434, Tahun 2019.

VII. PENGHARGAAN

1. Satyalancana Karya Satya X, 2012
2. Satyalancana Karya Satya XX, 2012
3. Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB, 2012.
4. Satyalancana Karya Satya XXX Tahun, 2018.
5. Penghargaan Pengabdian 35 Tahun ITB, 2022.
6. Penghargaan ITB Bidang Pengabdian Kepada Masyarakat, 2025.

VIII. SERTIFIKASI

1. Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
2. Sertifikasi Kompetensi Ahli Teknik Bangunan Gedung–Jenjang 9, Badan Nasional Sertifikasi Profesi, 2023.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id 📘 FgbItb 🐦 FGB_ITB
📱 @fgbitb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

