

**EVALUASI DAN TINDAKAN PENGURANGAN
KERENTANAN BANGUNAN GEDUNG BETON BERTULANG**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Ilmu Perkuatan Struktur (*Structural Retrofit*)
pada Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
pada Tanggal 7 Maret 2024**

**oleh:
Prof. Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono, IPU.**

Yang terhormat:

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat Universitas Gadjah Mada,

Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar Universitas Gadjah Mada,

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik Universitas Gadjah Mada,

Para Guru Besar Universitas Gadjah Mada

Dekan dan Wakil Dekan, Ketua dan Sekretaris Senat Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Rekan-rekan Dosen dan seluruh Sivitas Akademika Universitas Gadjah Mada

Tamu Undangan, Sanak Keluarga, serta hadirin sekalian yang saya hormati.

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Selamat pagi, Salam sejahtera untuk kita semua, Syaloom, Om swastiastu, Nammo budaya, Salam kebajikan

Pertama-tama, saya memanjatkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Murah, yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan kasih-Nya, sehingga kita dapat hadir di Balai Senat Universitas Gadjah ini dalam keadaan sehat untuk mengikuti acara pidato pengukuhan ini. Ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada hadirin semua yang telah berkenan untuk mendengarkan pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar dalam Bidang Ilmu Perkuatan Struktur (*Structural Retrofit*) di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Pada hari ini, perkenankan saya menyampaikan pidato dengan judul:

Evaluasi dan Tindakan Pengurangan Kerentanan Bangunan Gedung Beton Bertulang

Hadirin yang saya hormati,

Pendahuluan

Semakin hari semakin banyak infrastruktur fisik yang dibangun dalam rangka pemenuhan kebutuhan masyarakat. Infrastruktur fisik ini antara lain berupa bangunan gedung, bangunan perumahan dan fasilitas umum, stadion olah raga, bangunan industri, bangunan pembangkit tenaga listrik, menara transmisi dan komunikasi, jalan raya, jembatan, jalan kereta api, bandar udara, bendungan, terowongan, jaringan irigasi, sistem drainasi dan pengendalian banjir, penyediaan dan suplai air bersih, pelabuhan dan lain-lain.

Infrastruktur tersebut diharapkan dapat bertahan secara berkelanjutan sampai dengan umur layan yang direncanakan, bahkan lebih. Oleh karena selama pemakaian berada di suatu lingkungan tertentu, secara alami akan menghadapi risiko terjadi penurunan kinerja, berupa kerusakan bahkan keruntuhan yang disebabkan antara lain oleh degradasi bahan bangunan karena umur, bencana alam (angin, banjir, tanah longsor, gempa bumi), kelelahan (*fatigue*) akibat beban berulang, kebakaran dan kelebihan beban/muatan. Dari berbagai penyebab tersebut, pengalaman menunjukkan bahwa gempa bumi merupakan bencana yang paling signifikan dan berdampak besar pada kerusakan bangunan dengan menimbulkan korban jiwa dan harta benda. Indonesia berada di lokasi dengan gempa bumi tinggi, sering disebut area *ring of fire*. Hal ini menimbulkan kekawatiran dan keraguan terhadap bangunan-bangunan eksisting, khususnya yang berada pada daerah rawan gempa.

Dalam pidato ini, pembahasan akan dibatasi pada bangunan gedung yang terbuat dari beton bertulang, dengan alasan beton (*concrete*) telah menjadi material yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi (Harrer & Gaudette, 2017). Beton bertulang adalah material gabungan/komposit terdiri dari beton dan baja, yang bekerja sama sehingga mempunyai sifat yang sangat kuat untuk menahan gaya-gaya yang bekerja. Fungsi baja mirip tulangan pada tubuh manusia, bersama-sama dengan daging menyatu membentuk tubuh sehingga dapat berdiri, miring, jongkok dengan kokoh dan mampu

mengangkat/menjinjing beban. Perkembangan penggunaan beton bertulang tidak hanya menggambarkan perkembangan teknologi konstruksi, tetapi juga kondisi sosial dan ekonomi masyarakat (Setyowati, 2019). Namun pengalaman menunjukkan bahwa banyak bangunan gedung beton bertulang mengalami kerusakan bahkan keruntuhan akibat berbagai hal, khususnya gempa bumi, baik kategori bangunan sederhana (*non-engineered building*) maupun bangunan teknis (*engineered building*). Bangunan sederhana adalah bangunan yang direncanakan dan dilaksanakan tanpa bantuan tenaga ahli, sedangkan bangunan teknis melibatkan tenaga ahli.

Secara umum banyak bangunan gedung dengan bahan dari beton bertulang mempunyai kerentanan tinggi, yang disebabkan antara lain oleh kurang ideal dalam proses desain, defisiensi saat pelaksanaan konstruksi, pemeliharaan dan perawatan yang kurang optimal dan desain yang didasarkan pada standar lama. Di Indonesia berlaku Undang-undang 28/2002 tentang Bangunan Gedung, dengan peraturan pelaksanaannya tertuang dalam Peraturan Pemerintah (PP) 16/2021 sekaligus pencabutan PP sebelumnya yaitu nomor 36/2005. Salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk bangunan gedung adalah keandalan. Keandalan adalah suatu keadaan yang memenuhi persyaratan keselamatan, kesehatan, kenyamanan, dan kemudahan sesuai dengan kebutuhan fungsi yang telah ditetapkan. Untuk menjamin terpenuhinya persyaratan tersebut, Kementerian Pekerjaan Umum mengeluarkan Pedoman Pemeliharaan dan Perawatan Bangunan Gedung 24/PRT/2008. Untuk bangunan publik, penyelenggara bangunan harus mempunyai Sertifikat Laik Fungsi (SLF). Penerbitan dan perpanjangan SLF diatur dalam Permen PU 25/PRT/M/2007 tentang Pedoman Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung dan percepatan penerbitan SLF diatur dalam PP 16/2021.

Khusus untuk persyaratan keselamatan, suatu bangunan harus diupayakan agar dapat dicegah risiko terjadinya kerusakan/keruntuhan yang memakan korban jiwa, harta benda dan kerugian materiil lainnya. Tingkat resiko ditentukan dua hal, yaitu ancaman yang berasal dari luar/lingkungan dan tingkat kerawanan/kerentanan yang dipengaruhi *performance* bangunan. Kerentanan bangunan tergantung kekuatan,

kekakuan, dan kemampuan mengalami deformasi (daktilitas). Masing-masing ditentukan oleh dimensi, kualitas bahan bangunan, baik beton maupun baja tulangan, dan pendetailan tulangan. Pendetailan tulangan berkaitan dengan jumlah, penempatan dan pengatuan baja angkur, sambungan, sengkang, tulangan ikat, kait dan lain-lain. Dengan pendetailan tulangan yang baik suatu struktur mampu berdeformasi dan mengembangkan daktilitasnya dengan baik, diharapkan dapat mereduksi tingkat kerusakan struktur akibat beban gempa.

Hadirin yang saya hormati,

Evaluasi Bangunan yang Sudah Berdiri (Eksisting)

Untuk mengetahui keraguan dan kerawanan bangunan gedung eksisting perlu dilakukan evaluasi. Evaluasi merupakan suatu proses untuk mengetahui defisiensi suatu struktur bangunan yang menyebabkan bangunan tersebut tidak mencapai kinerja tertentu. Jika kinerja tidak terpenuhi, hasil evaluasi dapat ditindaklanjuti dengan tindakan pengurangan kerentanan atau usaha peningkatan kinerjanya, yaitu rehabilitasi. Rehabilitasi merupakan tindakan untuk meningkatkan kinerja komponen struktural atau nonstruktural yang teridentifikasi dalam evaluasi terhadap kinerja tertentu, dapat berupa retrofit, perkuatan atau perbaikan. Tujuan dilakukan evaluasi antara lain:

- a. secara umum untuk menjawab keraguan sebagian atau seluruh komponen, apakah masih memenuhi persyaratan keselamatan,
- b. memitigasi risiko kerusakan dan memperpanjang masa layan, yang telah dirancang dengan standar lama,
- c. memenuhi persyaratan laik fungsi berdasarkan PP 16/2021 Paragraf 6 Pasal 282 tentang pemenuhan SLF bangunan gedung yang sudah berdiri, dan
- d. memenuhi UU 6/2023 Pasal 34 (4), dalam rangka penyelenggaraan bangunan gedung diwajibkan untuk memenuhi standar teknis bangunan gedung, jika terdapat perubahan standar tetap harus memenuhi ketentuan standar teknis terbaru secara bertahap.

Sampai dengan awal tahun 2024 ini, Indonesia belum mempunyai standar khusus evaluasi bangunan gedung eksisting. Oleh karena itu untuk menindaklanjuti salah satu tujuan poin d di atas, evaluasi dapat mengacu pada standar desain. Untuk desain bangunan gedung yang terbuat dari beton bertulang, standar terbaru yang berlaku adalah Tata cara Perancangan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1729: 2019 (BSN, 2019) dan Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan SNI 2847: 2019 (BSN, 2019). Pada tahun 2021, Kementerian PUPR telah membentuk tim untuk menyusun standar evaluasi dengan mengadopsi *ASCE 41-17*. Standar ini diterbitkan oleh *American Society of Civil Engineers (ASCE)* dan merupakan salah satu aturan yang digunakan untuk evaluasi dan rehabilitasi seismik untuk bangunan gedung eksisting. Namun hingga hingga sekarang standar ini belum dikeluarkan secara resmi sebagai SNI.

Hadirin yang saya hormati,

Perkembangan Standar Desain dari Waktu ke Waktu

Berikut uraian singkat perkembangan standar desain bangunan gedung di Indonesia dari waktu ke waktu, baik standar desain gempa maupun desain beton bertulang. Kedua standar bangunan gedung tersebut dari tahun 1970 hingga sekarang telah mengalami beberapa kali perubahan. Standar ketahanan gempa untuk bangunan gedung selama ini telah mengalami perubahan beberapa kali, yaitu:

1. Peraturan Muatan Indonesia NI-18:1970
2. Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983
3. Tata cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726: 2002
4. Tata cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726: 2012, dan
5. Tata cara Perancangan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726:2019.

Perlu dicatat bahwa peta sumber dan bahaya gempa Indonesia, serta prosedur ketahanan gempa untuk bangunan gedung telah diperbarui dari waktu ke waktu. Besarnya kekuatan geser dasar terus direvisi agar dapat mengakomodasi beban gempa yang sering terjadi di wilayah-wilayah seluruh Indonesia.

Jika standar ketahanan gempa tersebut di atas dicermati, perubahan signifikan terjadi pada standar pada tahun 1983. Dalam standar sebelumnya belum diberlakukan perilaku struktur inelastis akibat gempa dan juga belum menerapkan mekanisme keruntuhan bangunan. Persyaratan gempa secara umum berubah secara signifikan pada tahun 1987. Bangunan yang didesain sebelum tahun tersebut sebagian besar tidak mematuhi ketentuan ketahanan gempa terakhir yang berlaku saat ini. Pada standar gempa 2002 juga terjadi perubahan signifikan, telah menggunakan spektrum respons elastis dan menerapkan faktor modifikasi (R) untuk mengakomodasi respons struktur inelastis, serta penggunaan faktor kekuatan berlebih untuk melindungi elemen struktur.

Oleh karena standar ketahanan gempa terbaru adalah SNI 1726-2019 yang digunakan sebagai dasar evaluasi, maka perlu dicermati, apa saja ketentuan-ketentuan yang baru dan mengikat dibandingkan dengan standar sebelumnya. Standar ini mengacu pada standar analisis dan desain ASCE 7-16 (ASCE, 2016) di Amerika dengan menggunakan Peta Gempa Indonesia terkini, yang dikembangkan pada tahun 2017 (PUPR, 2017). Dengan peta gempa terbaru, kebutuhan gempa di beberapa wilayah di Indonesia secara umum mengalami peningkatan dibandingkan dengan peta sebelumnya. Selain itu dalam standar ini telah diterapkan peta periode panjang.

Dalam standar tahun 2019, seperti pada standar tahun 2012, tidak ada istilah zona gempa lagi, tetapi peta secara langsung memuat beberapa parameter gempa dalam desain gempa seperti peta gempa bertarget risiko, kategori desain gempa, tingkat gempa yang lebih tinggi serta konsekuensi jika terjadi penyimpangan. Bangunan gedung wajib dirancang tahan gempa dengan periode ulang 2.500 tahun dan penyesuaian target risiko dan Targeted-Risk Maximum Pertimbangan Gempa Bumi (MCER) dikalikan dengan suatu faktor tertentu. Standar

ini mensyaratkan agar struktur bangunan tidak runtuh jika terjadi gempa MCER. Dalam hal ini, elemen struktur perlu diberikan detail penulangan dan kekuatan cukup dan memadai untuk menjamin berperilaku stabil meskipun mengalami deformasi inelastis yang besar. Prinsipnya struktur bangunan dapat dirancang terhadap beban gempa yang dikurangi dengan faktor modifikasi respon (R) yang mencerminkan tingkat daktilitasnya. Dalam standar diberlakukan pembatasan gaya gempa (dinamik) minimum 100% dari metode statis. Akibat pembatasan ini terjadi peningkatan gaya gempa yang cukup signifikan dibandingkan standar sebelumnya.

Komponen struktur tertentu bersifat ulet, dapat mengalami plastisitas sebagai sarana penyerapan energi gempa tanpa terjadi keruntuhan. Kebutuhan gempa dalam hal kekuatan bergantung pada tingkat daktilitas dan pendetailan tulangan, khususnya pada komponen-komponen pembentuk sistem rangka pemikul momen. Komponen struktur lainnya seperti tangga darurat dan struktur atap harus tetap elastis tidak mengalami kerusakan saat terjadi gempa. Hierarki plastifikasi komponen struktur perlu dirancang dengan konsep desain kapasitas. Semua komponen struktur tidak dibuat sama kuatnya. Beberapa komponen dirancang lebih lemah dibandingkan lainnya untuk mengarahkan dan memastikan bagian komponen struktur tertentu mengalami kerusakan terlebih dahulu akibat beban gempa rencana. Sementara komponen lainnya diharapkan tetap elastis dengan kuat perlu lebih tinggi dengan menggunakan faktor kekuatan berlebih. Konsep yang berlaku dalam standar ketahanan gempa ini telah sinkron dengan ketentuan dalam standar bangunan beton struktural.

Hadiri yang saya hormati,

Perkembangan Standar Bangunan Beton

Selain perkembangan ketentuan ketahanan gempa sebagaimana diuraikan di atas, perkembangan juga terjadi pada standar bangunan beton, khususnya yang berkaitan dengan kekuatan dan daktilitas terhadap beban gempa. Dalam periode hampir bersamaan, telah terjadi 7 (tujuh) kali pergantian, berturut-turut, yaitu sebagai berikut:

1. Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (N.I-2),
2. Buku Pedoman Perencanaan untuk Struktur Beton Bertulang Biasa dan Struktur Tembok Bertulang untuk Gedung 1983,
3. Petunjuk Perencanaan Beton Bertulang dan Struktur Dinding Bertulang untuk Rumah dan Gedung, SKBI 2.3.53.1987,
4. Tata Cara Penghitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, SK SNIT-15-1991-03 yang kemudian resmi menjadi SNI 03-2847-1992,
5. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, RSNI 03-2847- 2002,
6. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, SNI 2847-2013 dan terakhir
7. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan, SNI 2847-2019.

Standar tentang struktur beton bertulang diadopsi dari berbagai negara, yaitu Eropa (Belanda dan Inggris), Selandia Baru dan Amerika Serikat. Beberapa peraturan lainnya yang terkait biasanya diacu langsung dari standar yang berlaku di masing- masing negara tersebut di atas, misalnya terkait tentang persyaratan material baja, material beton, cara uji, dan evaluasi kualitas bahan.

Selain kebutuhan gempa yang secara umum terjadi peningkatan, evaluasi juga perlu memperhatikan kesenjangan persyaratan detail penulangan yang diatur pada masing-masing standar. Perubahan signifikan terjadi pada tahun 1980-an, saat terjadi perubahan konsep perancangan dari *allowable stress design (ASD)* menjadi *ultimate strength design (USD)*. Dalam *USD* diberlakukan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan. Beberapa ketentuan penting perlu dikonfirmasi, khususnya yang terkait dengan kualitas bahan, perencanaan penulangan dan ketentuan detail penulangan. Dalam tujuh standar di atas, beberapa ketentuan terjadi perubahan signifikan, yang mencakup:

1. Kualitas bahan

Peningkatan kekuatan tekan beton minimum untuk bangunan tahan gempa dari K-175 dalam PBI 1971 ekivalen dengan kekuatan tekan 14,5 MPa. Dalam standar selanjutnya tahun 1987 menjadi 20

MPa, dan saat ini 21 MPa. Tegangan leleh baja tulangan diperbolehkan ≥ 320 MPa (PBI 1971) kemudian meningkat menjadi 400 MPa dan saat ini 420 MPa (SNI 2847-2019). Selain itu harus dipenuhi persyaratan perbandingan kuat tarik aktual dan tegangan leleh aktual serta regangan putus minimum untuk memastikan terjadinya pengembangan sendi plastis dan terjamin terjadi plastifikasi saat gempa besar. Yang juga perlu diperhatikan adalah cara uji tarik baja tulangan di Indonesia sampel uji tidak boleh dibubut, berbeda dengan standar ASTM boleh dibubut (Triwiyono dkk., 2020).

2. Perancangan geser

Perubahan signifikan mencakup ketentuan geser yang diberikan terhadap keruntuhan pada tegangan diagonal di dekat titik momen nol, di mana tulangan utama biasanya dihentikan. Untuk perancangan geser dalam PBI 1971 didasarkan geser rencana seperti pada Rangka Momen Biasa, yang nilainya didapatkan langsung dari hasil analisis struktur, sedangkan dalam SK-SBI 2.3.53.1987 sampai standar yang berlaku sekarang, untuk Rangka Momen Menengah dan Khusus gaya geser rencana didasarkan pada kapasitas lentur terpasang. Dalam standar selanjutnya hingga standar yang terakhir ketentuan ini tetap berlaku, dengan pengembangan rumus-rumus pendekatan untuk mendapatkan kuat geser rencana. Desain kapasitas bertujuan untuk memastikan bahwa struktur berperilaku daktail.

3. Kontribusi geser beton

Dalam PBI 1971 berlaku bahwa beton diperhitungkan berkontribusi terhadap ketahanan geser di seluruh bagian komponen struktur, termasuk pada daerah ujung balok/kolom. Dalam SK-SBI 2.3.53.1987 dan standar selanjutnya untuk persyaratan daktilitas tinggi beton dianggap tidak berkontribusi pada kekuatan geser.

4. Konsep kolom kuat-balok lemah (*strong column-weak beam*)

Dalam PBI 71 tidak ada konsep kolom kuat-balok lemah. Perubahan signifikan terjadi pada detail penulangan pada standar berikutnya. Sebelum tahun 1987 konsep desain kolom kuat-balok lemah dan desain kapasitas belum diterapkan. Sebagai catatan kolom kuat-balok lemah dalam standar bertujuan untuk mengurangi

kemungkinan terbentuknya mekanisme keruntuhan pada kolom di setiap tingkat, sedangkan desain kapasitas untuk memastikan bahwa struktur berperilaku duktail.

5. Penambahan luas penampang tulangan melintang

Rasio dan detail tulangan melintang khususnya pada Rangka Momen Khusus mengalami perubahan untuk menghindari kegagalan struktur terjadi pada area sendi plastis. Paling ketat berlaku dalam SNI 2847-2019, khususnya pada sistem rangka momen khusus jarak tulangan melintang tidak lebih dari 100 mm, terutama jika dikategorikan sebagai $Pu > 0,3Agf'_c$ atau $f'_c > 70$ Mpa.

6. Sambungan balok-kolom

Agar sambungan balok-kolom tahan terhadap gempa, perlu tulangan transversal yang memadai agar terjadi pengekanan yang baik sehingga tidak terjadi kerusakan dini sebelum terjadinya leleh baja tulangan balok di muka kolom. Pengekanan kolom pada sambungan balok kolom dengan menerapkan tulangan transversal dipersyaratkan sejak peraturan beton 1987.

7. Persyaratan kait

Untuk menjamin terjadinya efek kekangan, maka kait pada sengkang, *hoop* dan tulangan ikat sangat penting dengan pembengkokan kait tidak kurang dari ¹³⁵⁰. Untuk kolom seluruh tingkat daktilitas dan balok dengan tingkat daktilitas 3 (rangka pemikul momen khusus) harus mengikuti ketentuan ini. Dalam SNI 2847: 2019 kait dengan sudut ini dinamakan kait gempa.

8. Ikatan silang (*coss ties*)

Dalam PBI 1971 dan SKBI 2.3.53.1987 belum diatur tentang ikatan silang. Selain itu, belum diatur jarak sengkang pertama pada balok terhadap muka kolom. Jarak yang berlebihan menyebabkan respons ujung balok kurang memadai saat menerima eksitasi gempa.

9. Jarak sengkang

Dibandingkan dengan standar beton sebelumnya, perbedaan signifikan terjadi pada tahun 2002. Pada standar beton ini persyaratan detail penulangan cukup ketat seperti jumlah tulangan transversal,

dalam rangka menjamin terjadinya efek pengekanan, jarak maksimum begel dan jarak maksimum ikatan silang. Pengaturan jarak maksimum sengkang pada balok dan kolom semakin ketat dan terjadi perubahan signifikan pada SNI 2847-2013 dengan jarak maksimum tidak boleh melebihi $6d_b$ dan atau $8d_b$ (dalam peraturan sebelumnya). Jarak maksimum sengkang balok juga diubah dari 300 mm menjadi 150 mm.

Secara umum dalam standar terbaru, selain persyaratan kekuatan, sangat ditekankan pendetailan tulangan yang lebih ketat dalam rangka pemenuhan persyaratan daktilitas untuk menjamin struktur dapat mengalami deformasi inelastik saat menerima beban gempa besar.

Hadirin yang saya hormati,

Penyebab Kerusakan Bangunan Gedung Beton Bertulang akibat Gempa

Setelah memahami ketentuan dan perbedaan dalam standar yang telah diuraikan di atas, selanjutnya dapat dilakukan analisis penyebab kerusakan. Secara umum kerusakan bangunan gedung beton bertulang akibat gempa disebabkan antara lain oleh kualitas bahan yang tidak mencukupi dan persyaratan pendetailan penulangan yang tidak memadai. Selain itu dari hasil pengamatan pasca gempa terhadap bangunan gedung yang sudah rusak, ditemukan ketidaksesuaian antara kemampuan tingkat kinerja dengan fungsi bangunan (Satyarno, 2010). Hal ini tidak terlepas dari standar desain yang digunakan saat pembangunan. Sebagai contoh, bangunan sekolah dan rumah sakit, yang seharusnya mempunyai tingkat kinerja dengan kategori risiko tinggi, namun terjadi kerusakan parah akibat gempa. Sejak standar ketahanan gempa tahun 2012 secara tegas dipersyaratkan bahwa bangunan sekolah mempunyai faktor kepentingan tinggi karena digunakan sebagai bangunan evakuasi saat terjadinya bencana.

Keruntuhan bangunan di beberapa lokasi terjadinya gempa terutama juga disebabkan oleh ketidakkonsistenan desain, kesenjangan antara gaya gempa dengan kemampuan geser dasar bangunan eksisting dan

ketidaksesuaian detail penulangan. Gempa di Yogyakarta tahun 2006 (Elnashai dkk., 2007), gempa di Padang tahun 2009 (Wilkinson dkk., 2009) dan gempa di Palu tahun 2018 (Irsyam dkk., 2018) telah mengkonfirmasi bahwa banyak bangunan tidak mempunyai kinerja sesuai yang diharapkan.

Peningkatan gaya geser dasar sebenarnya telah diperkirakan sebelum terjadinya gempa bumi Palu tahun 2018. Dalam standar pembebanan gempa tahun 2012 telah ada peningkatan cukup signifikan, namun ternyata beban gempa yang terjadi lebih besar hingga beberapa bangunan tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk bertahan dari gempa tersebut.

Selain tidak mempunyai kapasitas gaya geser dasar yang memadai, juga tidak memiliki kemampuan deformasi untuk menahan gempa besar karena sebagian besar didesain dengan standar lama. Dalam standar lama, misalnya standar ketahanan gempa tahun 2002 dimungkinkan untuk menggunakan sistem struktur dengan daktilitas terbatas, atau menengah. Namun ternyata cukup rentan, sehingga dalam standar berikutnya (SNI 1726-2012) tidak boleh digunakan lagi karena harus digunakan sistem daktail penuh. Kesenjangan ini juga menjadi penyebab terjadinya kerusakan bangunan gedung.

Ketentuan dalam Evaluasi Bangunan Gedung Beton Bertulang

Dua standar yang telah diuraikan di atas mempunyai kekuatan hukum sebagai persyaratan minimum. Dalam evaluasi, beban gempa berdasarkan standar gempa terbaru digunakan sebagai pembanding dalam menentukan tingkat kerentanan bangunan dikombinasikan dengan persyaratan detail penulangan pada standar beton. Secara umum persyaratan detail penulangan bangunan eksisting yang didesain dengan standar lama tidak seketat peraturan baru.

Sebenarnya kedua standar tersebut digunakan dalam proses desain, sehingga secara spesifik tidak mengatur proses evaluasi untuk gedung eksisting. Namun demikian, dalam SNI 2847: 2019 Pasal 27 diatur ketentuan untuk evaluasi kekuatan bangunan gedung eksisting, baik keseluruhan ataupun sebagian struktur. Evaluasi dapat dilakukan

dengan dua cara, yaitu uji beban dan analisis. Evaluasi dengan dua cara ini sebenarnya telah diatur dalam standar bangunan beton sejak tahun 1991. Cara uji beban ditekankan pada keandalan komponen struktur, biasanya komponen horizontal terhadap beban gravitasi. Penerapan cara uji beban pernah dilakukan Triwiyono dan Priyosulistyo (2005) untuk evaluasi sebuah bangunan gedung pasca kebakaran.

Dalam evaluasi dengan cara analisis digunakan model struktur, yang didasarkan pada konfigurasi geometrik, dimensi komponen struktur yang didapatkan dari hasil pengukuran lapangan atau boleh juga dari *as built drawing*, asalkan sudah dilakukan verifikasi pemeriksaan lapangan. Kualitas bahan dapat berupa estimasi kekuatan beton ekuivalen $f'_{c,ek}$ dari hasil uji beton inti, yang diambil dari bagian struktur, di mana kekuatannya diragukan. Dalam evaluasi cara analisis ini perlu diperhatikan beberapa ketentuan, antara lain: pendetailan tulangan sebagai implementasi dari sistem rangka pemikul momen biasa, menengah atau khusus, yang akan berpengaruh pada pemilihan reduksi beban gempa disesuaikan dengan rencana penggunaan gedung selanjutnya. Evaluasi dengan cara analisis ini tentunya juga akan menggunakan standar terbaru lainnya yang terkait, antara lain standar pembebanan dan standar ketahanan gempa.

Selain evaluasi berdasarkan kedua standar terakhir yang telah diuraikan di atas, saat ini sedang dikembangkan cara evaluasi yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan banyak hal. Standar ini diterbitkan oleh *American Society of Civil Engineers (ASCE)* dan merupakan salah satu aturan yang digunakan untuk evaluasi dan rehabilitasi gempa untuk bangunan gedung eksisting. Sosialisasi standar ini berupa bimbingan teknis telah dilaksanakan oleh Balai Bahan dan Struktur Bangunan Gedung, Direktorat Jendral Ciptakarya Kementerian PUPR. Berdasarkan ASCE 41-17 prosedur evaluasi bangunan gedung terdiri dari 3 tahap, yaitu *tier 1*, *tier 2*, dan *tier 3*. *Tier 1* merupakan *quick check* terhadap parameter yang terdapat pada ASCE 41-17. Dalam *tier 1* ini membandingkan beberapa besaran yang terjadi dengan persyaratan, antara lain *drift ratio*, tegangan geser, dan tegangan guling. Setelah itu, dilanjutkan dengan *tier 2 deficiency-based evaluation and retrofit*, yang berisi prosedur tentang perhitungan

Demand Capacity Ratio (DCR) setiap komponen struktur. Tahap akhir berupa evaluasi *tier 3*, yaitu *prosedur systematic evaluation and retrofit*, membahas tentang analisis nonlinear yang menunjukkan perilaku bangunan ketika proses keruntuhan berlangsung.

Hadirin yang saya hormati,

Estimasi Kekuatan Tekan Beton Ekuivalen ($f'_{c,ek}$)

Catatan penting yang perlu diperhatikan dalam evaluasi, baik berdasarkan peraturan terbaru SNI 2847:2019 dan SNI 1726-2019 maupun ASCE 41-17 adalah penentuan kekuatan tekan beton yang digunakan dalam pemodelan analisis struktur bangunan gedung yang dievaluasi. Dalam SNI 2847:2019 tidak dibahas secara khusus, bagaimana cara menentukan besarnya kekuatan tekan ekuivalen $f'_{c,ek}$ bangunan eksisting. Dalam Bab 8 dan Bab 9 standar ini diatur tentang investigasi kuat tekan sampel beton inti dan metode penentuan $f'_{c,ek}$, untuk bangunan yang sedang dalam masa pembangunan dengan persyaratan rerata dari 3 sampel minimum sama dengan $0,85f'_c$ dan masing-masing tidak ada satu sampel yang kurang dari $0,75f'_c$. Sedangkan untuk menentukan estimasi nilai $f'_{c,ek}$, bangunan eksisting SNI 2847: 2019, Pasal 27.3.1.3 di bagian Penjelasan, menyarankan untuk menggunakan *Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results (ACI 214.4R)*. Dengan ketentuan ini untuk penentuan kekuatan tekan ekuivalen hasil uji tidak digunakan pembalikan dua persyaratan di atas, tetapi dengan diberlakukan ketentuan dalam *ACI 214.4R*.

Kekuatan tekan ekuivalen setempat (f'_c) didapatkan dengan mengalikan kekuatan tekan inti beton hasil uji *crushing test* (f_{core}) dengan 4 (empat) faktor yang mempengaruhinya, yaitu: faktor koreksi kekuatan rasio L/d , faktor koreksi kekuatan dari diameter, faktor koreksi kekuatan karena kelembaban, dan faktor koreksi kekuatan akibat kerusakan proses *coring*. Selanjutnya dengan mengacu *ACI 214.4R-10* pada Bab 9.4 perlu ditentukan tingkat kepercayaan yang diinginkan untuk mendapatkan nilai kekuatan tekan ekuivalen. Untuk penentuan tingkat kepercayaan (*confidence level*), *ACI 214.4R-10*

mengacu saran Hindo dan Bergstrom (1985), tergantung kepada fungsi bangunan:

- a. tingkat kepercayaan 75% untuk *ordinary structures*,
- b. 90% untuk *important buildings*, dan
- c. 95% untuk komponen yang krusial, sebagai contoh *nuclear power plants*.

Bartlett dan MacGregor (1995) mengusulkan penggunaan persamaan untuk menghitung $f'_{c,ek}$, dengan persamaan-persamaan yang telah diacu dalam ACI 214.4R-10.

Hadirin yang saya hormati,

Rehabilitasi Bangunan Gedung Beton Bertulang

Sebagaimana telah diuraikan di atas, faktor utama yang mempengaruhi kerawanan bangunan beton bertulang eksisting adalah kekuatan geser dasar dan pendetailan tulangan. Jika hasil evaluasi didapatkan bahwa kinerja bangunan gedung tidak terpenuhi sesuai fungsinya, dapat ditindaklanjuti dengan tindakan penurunan tingkat kerentanannya. Perlu dicatat di sini bahwa fungsi bangunan dapat diubah peruntukannya untuk menyesuaikan dengan target kinerjanya. Evaluasi dengan mengacu pada standar terbaru yaitu standar ketahanan gempa SNI 1726-2019 maupun standar bangunan beton SNI 2847:2019 ataupun dengan ASCE 41-17 dimungkinkan bangunan diubah fungsinya untuk menyesuaikan keterbatasan kinerja yang bisa dipenuhi.

Jika berdasarkan fungsi barunya masih belum dipenuhi, maka satu alternatif tindakan yang dapat dilakukan adalah peningkatan kinerja, berupa *retrofit*, perkuatan atau perbaikan. *Retrofit* dan perkuatan merupakan tindakan untuk meningkatkan kinerja dengan cara penambahan komponen atau/asesoris, sedangkan perbaikan merupakan tindakan mengembalikan pada kondisi awal, masing-masing bertujuan agar kinerja dapat terpenuhi sesuai dengan fungsi barunya. *Retrofit* dan perkuatan dapat dilakukan dengan berbagai cara, sesuai dengan tujuannya, yaitu untuk menaikkan kekuatan, kekakuan atau daktilitasnya atau gabungan dari masing-masing.

Bangunan sederhana rumah tinggal dalam SNI 1726: 2019 masuk kategori risiko II dengan ketinggian satu atau dua tingkat mempunyai komponen struktur pemikul untuk didesain dengan nilai R terkecil. Dinding pasangan bata, baik tanpa maupun diperkuat dan menyatu dengan sistem rangka akan berfungsi sebagai diafragma kantilever vertikal. Rumah dengan pasangan bata kebanyakan rusak akibat gempa di beberapa wilayah disebabkan karena kekuatan yang kurang memadai. Meskipun gempa yang terjadi masih relatif rendah, namun banyak bangunan rusak bahkan runtuh. Oleh karena itu rumah tinggal, khususnya yang terbuat dari pasangan bata perlu mempunyai kekuatan yang memadai. Dinding bata perlu dikekang keempat sisinya dengan rangka beton bertulang, perlu ikatan kuat antara rangka ini dengan pasangan bata dan dengan fondasi di bawahnya sebagaimana tercantum dalam Buku Saku Persyaratan Rumah Pokok yang Lebih Aman (PUPR-JICA, 2019).

Untuk bangunan eksisting perkuatan dapat dilakukan dengan beberapa cara, beberapa cara telah dikembangkan di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM. Perkuatan dengan cara pemberian rangka pengekang yang terbuat dari beton bertulang dapat diterapkan dengan cara pembobokan sebagian dinding untuk penempatan rangka tersebut. Triwiyono dkk. (2015) telah melakukan penelitian dengan cara ini dengan hasil yang cukup efektif (kuat dan daktil) terhadap beban arah *in plane*. Penambahan rangka beton bertulang pada dinding pasangan bata dapat meningkatkan kekuatannya secara signifikan dan mendekati seragam meskipun dinding terbuat dari bata dengan beragam kualitas. Triwiyono dan Eratodi (2018) menyarankan agar tulangan kolom rangka terangkut dengan baik ke dalam fondasi agar tidak tercabut saat rangka menerima gaya tarik dan menyebabkan kerusakan bersifat *brittle*. Namun demikian, kerusakan dinding pasangan bata banyak diakibatkan oleh karena beban yang tegaklurus (*out of plane*) terhadap dinding.

Perkuatan terhadap beban arah tegaklurus dinding dapat dilakukan antara lain dengan penambahan kawat kasa/*wiremesh* pada permukaan dinding pasangan bata kemudian diplester agar menyatu

dengan dinding (Wardah dkk., 2012). Bahan perkuatan lain yang dapat diaplikasikan adalah *polypropylene band*. Penelitian dengan bahan perkuatan ini pernah diteliti oleh Triwiyono dkk. (2016) dan Sugijoprano dkk. (2017). Bahan perkuatan ini dapat dibeli di pasaran dengan mudah dan harga yang terjangkau serta mudah diaplikasikan dengan tenaga tukang setempat. Beberapa telah diaplikasikan untuk perkuatan rumah tinggal di Bantul pasca gempa Yogya 2006 ataupun telah menjadi *home industry* diproduksi di Bantul untuk dikirimkan ke daerah lain untuk mitigasi kerusakan gempa.

Untuk *engineered building* banyak cara retrofit yang dapat diaplikasikan di lapangan dan telah didukung banyak penelitian, misalnya menambahkan komponen struktur, pengisian lobang rangka dengan dinding/panel, penambahan *bracing*, pelapisan/*confining* komponen struktur dan lain-lain. Retrofit bertujuan untuk menambah kekuatan, kekakuan, daktilitas atau gabungan dari dua atau tiga tujuan secara bersamaan, tergantung tingkat kinerja yang dituju. Retrofit dapat dilakukan untuk skala komponen struktur, keseluruhan struktur dan komponen non struktur.

Perlu dicatat bahwa pemilihan perkuatan sangat dipengaruhi oleh kondisi awal bangunan eksisting, kapan atau dengan standar yang mana bangunan ini telah didesain dan dibangun serta fungsi/tingkat kinerja yang dituju. Banyak bahan yang dapat diaplikasikan untuk retrofit, perkuatan, perbaikan, proteksi yang telah dikembangkan, diproduksi, diaplikasikan oleh fabrikasi spesialis dan aplikator. Banyak perusahaan yang bergerak di bidang evaluasi dan penanganan dengan berbagai pengalaman.

Beberapa penelitian yang pernah juga dilakukan di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM antara lain perkuatan dengan metode *near surface-mounted (NSM)* secara eksperimental dengan memanfaatkan material perekat epoksi produk fabrikasi dan material baja tulangan sirip sebagai pengganti *fiber reinforced polymer (FRP)* telah dilakukan oleh Yustikarini dan Triwiyono (2006) dan Eगतama dkk. (2020). Penelitian ini telah dikembangkan oleh Faveryan dkk. (2021) dengan pendekatan model elemen hingga nonlinier. Laban dan Triwiyono (2012) pernah meneliti

perkuatan dengan metode *jacketing* pada kolom dengan bahan *FRP*, hasilnya cukup efektif untuk menaikkan kapasitas tekan, lentur dan daktilitas.

Selain beberapa jenis perkuatan yang telah diuraikan di atas, dapat pula dilakukan dengan penggunaan sistem disipasi energi, antara lain isolator dasar (*base isolator*) dan peredam (*damper*). Dengan sistem ini energi gempa tidak sepenuhnya diterima bangunan, sehingga dapat mencegah kerusakan atau mengurangi kerentanannya. Biasanya isolator ditempatkan pada dasar bangunan dengan tujuan untuk mengubah waktu getar alami menjadi lebih panjang, sehingga akan mengurangi gaya geser dasar. Pemakaian isolator untuk bangunan sederhana telah diteliti dan dikembangkan oleh Wijaya (2020) dengan material lokal terbukti telah berfungsi dengan baik dan relatif murah. Sistem disipasi energi pasif dapat digunakan untuk bangunan bertingkat rendah, menengah hingga tinggi. Sistem ini efektif untuk bangunan rendah (*low rise building*), yang pengadaannya mudah dan cukup murah (Nurchasanah dkk., 2022).

Penutup dan Ucapan Terima Kasih

Para hadirin yang saya hormati,

Dalam upaya pemanfaatan infrastruktur secara berkelanjutan khususnya bangunan gedung beton bertulang diperlukan evaluasi keamanan berdasarkan standar terakhir. Perkembangan standar di Indonesia, yaitu peraturan beban gempa yang diterbitkan pada tahun 1970 dan peraturan beton bertulang pada tahun 1971 hingga standar terakhir memperlihatkan perubahan yang signifikan. Dalam rangka evaluasi perlu diperhatikan perbandingan atau kesenjangan kebutuhan gempa dan detail penulangan bangunan gedung eksisting.

Apabila evaluasi didapatkan hasil bahwa bangunan rentan atau tidak memenuhi persyaratan keandalan, maka dapat dilakukan tindakan rehabilitasi untuk mengurangi kerentanan dengan beberapa metode, antara lain perubahan fungsi bangunan dan perkuatan struktur. Hingga saat ini telah berkembang metode perkuatan struktur. Banyak bahan yang dapat diaplikasikan untuk retrofit, perkuatan, perbaikan, proteksi

yang telah dikembangkan, diproduksi, diaplikasikan oleh fabrikasi spesialis dan aplikator. Banyak perusahaan bergerak dalam pelaksanaan dengan berbagai pengalaman yang dimiliki.

Sebagai akhir dari pidato ini, perkenankan saya mengucapkan syukur atas karunia dan kasih Tuhan Yang Maha Murah, sehingga saya dapat menyampaikan pidato pengukuhan Guru Besar ini. Apa yang telah saya capai selama ini tidak terlepas dari peran dari berbagai pihak. Terima kasih saya haturkan kepada Pemerintah Republik Indonesia yang telah memberikan kepercayaan dan amanah kepada saya sebagai Guru Besar di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ketua, pengurus dan seluruh dosen Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan di Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Senat dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Senat Akademik dan Rektor Universitas Gadjah Mada beserta jajarannya yang telah mendorong dan menyetujui pengajuan kenaikan jabatan saya kepada Pemerintah Republik Indonesia.

Rasa hormat dan terima kasih saya haturkan kepada almarhum Bapak Ir. H. Soetojo Tjokrodihardjo atas dorongan dan semangat kepada saya untuk menjadi dosen di Jurusan Teknik Sipil FT UGM, kepada almarhum Bapak Ir. Sugeng Djojowiriono, yang telah memberikan perhatian saat saya menempuh studi lanjut di Jerman. Beliau didampingi almarhum Bapak H. Ir. Istimawan Dipohusoho, almarhum Bapak Ir. Fitri Mardjono, M.Sc. dengan sabar telah memberikan bimbingan dalam penyelesaian tugas akhir saya. Juga kepada bapak ibu dosen yang telah memberikan bekal selama kuliah hingga menjadi dosen di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM. Terima kasih dan penghargaan yang tinggi saya haturkan kepada almarhum Prof. Ir. Pragnjono Mardjikon yang telah memberikan rekomendasi dan dorongan dan semangat saat menempuh studi program doktor sehingga dapat berjalan lancar. Terima kasih kepada Prof. Ir. Sudjawadi, M.Eng., Ph.D. sewaktu beliau bertugas di DIKTI atas penerimaan hangat dan dukungan saat saya menyelesaikan studi dan kembali ke Indonesia.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada para guru dan senior di Kelompok Bidang Keahlian Teknik Struktur, yaitu almarhum Prof. Ir. Morisco, Ph.D., almarhum Ir. Kardiyono Tjokrodimulyo, ME., Bapak Ir. Soehendrodjati, Prof. Ir. Henricus Priyosulistyo, M.Sc., Ph.D., Prof. Ir. Bambang Suhendro, M.Sc., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Bambang Supriyadi, CES. DEA., Prof. Ir. Iman Satyarno. ME., Ph.D. serta rekan-rekan dosen lain yang tidak saya sebutkan satu persatu, atas bimbingan, kerjasama dan kebersamaan yang terjalin dengan baik dalam pengembangan pengajaran dan penelitian serta pengabdian kepada masyarakat khususnya bidang struktur.

Kepada Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mehhorn dan Prof. Dr.-Ing. Dieter Haberland, saya menyampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya atas didikan dan bimbingan selama menempuh program penyeteraan dan program doktor hingga meraih gelar Doktoringenieur (Dr.-Ing) di Gesamthochschule Kassel Universitaet, Jerman di bidang Teknik Struktur. Secara khusus saya sampaikan terima kasih kepada Prof. Ir. Teuku Faisal Fathani S.T., M.T., Ph.D., IPU., ASEAN Eng. dan Prof. Ir. Henricus Priyosulistyo, M.Sc., Ph.D., yang telah berkenan menjadi *reviewer* dan memberikan masukan naskah pidato pengukuhan guru besar saya ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan para senior dan kolega di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, atas kerjasama yang telah terjalin dengan baik, tanpa mengurangi rasa hormat tidak saya sebutkan nama satu-persatu.

Rasa hormat dan terima kasih saya haturkan kepada para guru saya di SD Negeri 2 Patihan Sidoharjo Sragen, SMP Negeri 1 Sragen dan SMA Negeri 3 Surakarta. Terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada teman-teman di sekolah dasar, teman-teman SMP yang tergabung dalam Alumni SMPN 1/77 Sragen, teman-teman SMA yang tergabung dalam PANJI, teman-teman SIPIL UGM 81, Kos-kosan Swakarya Kenari 26. Khusus kepada almarhum Mas Juripno sebagai Ketua angkatan alumni SMP, yang beberapa waktu yang lalu dipanggil Tuhan, semoga beristirahat dalam kedamaian di sisiNya. Terima kasih juga disampaikan kepada teman-teman pengurus dan anggota Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI) Komda Yogyakarta dan

HAKI Pusat atas kebersamaan dalam memajukan dunia konstruksi di Indonesia. Kepada teman-teman organ Pengurus, Pengawas, dan Pembina Yayasan Slamet Rijadi Yogyakarta (YSRY) yang telah bersama-sama memberikan pendampingan kepada para pendidik anak-anak muda dalam mencapai cita-citanya untuk mendapatkan kesempatan berkontribusi memajukan negara untuk kesejahteraan masyarakat. Kepada yang mulia Mgr. Rubiyatmoko, Uskup Keuskupan Agung Semarang sebagai Ketua Pembina YSRY, yang telah memberikan perhatian penuh dalam karya pendidikan anak muda.

Perkenankanlah saya menghaturkan sembah sungkem dan terima kasih tiada henti kepada kedua orang tua yang tercinta almarhumah Ibu Maria Assumta Dariyem Partodihardjo dan almarhum Bapak Petrus Sadakir Partodihardjo, yang telah menjadi perantara Sang Pencipta, sehingga saya berkesempatan menjadi saksi atas kebesarannya. Terima kasih atas segala cinta, kasih sayang yang tiada henti dalam mengasuh dan mendidik saya dengan segala kesederhanaan dan keterbatasan beliau dan kelemahan-kelemahan saya. Saya percaya kedua beliau sudah berada di alam kedamaian dan menjadi pendoa bagi kami agar selalu mendekatkan diri kepadanya. Kepada kedua bapak ibu mertua yang tercinta, almarhumah Ibu Margarita Samilah Sudirjo, almarhum Bapak Robertus Sudirjo, saya menghaturkan terima kasih atas kasih sayang dan doa restu yang selalu diberikan kepada keluarga dan kepada saya. Terima kasih juga atas kebersamaan dengan kami sekeluarga di saat kesehatan sudah menurun di masa sepuh.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada keluarga Paklik Suparjo Sragen, adik dari almarhumah ibu dan keluarga Paklik Sukarno HS. Solo, adik dari almarhum bapak, yang telah menjadi wakil dan mendampingi bapak ibu mendidik saya dengan penuh kasih sayang semasa pendidikan di SMP dan SMA. Bersama kedua keluarga ini saya telah banyak belajar arti kebersamaan dan persatuan dalam kebhinekaan. Kepada Adimas Dr. Drs. Suyoto HS., M.Si., MMA. dan keluarga, atas dorongan dan semangat yang telah diberikan semasa persiapan dan pendampingan selama menempuh studi di UGM. Terima kasih juga saya sampaikan kepada keluarga besar Trah Martoredjo,

keluarga besar Trah Sopiyo dan keluarga besar Trah Sadinah atas dorongan, perhatian dan kerukunan yang selalu terjalin dengan baik.

Kepada adik-adik dan kakak-kakak: Mujiyono, Mini Ernawati, Dra. Titik Suharni, Tejo Pramono, B.Sc., Dra. Cicilia Titi Budiastuti, Ir. FX. Wibowo, Dra. Rosalia Chrystiani, Drs. Trisnu Danisworo, M.Si., Prof. Dr. Drg. Regina Titi Chrystinawati, M.Sc., Prof. Dr. Drs. Eduardus Tandelilin, M.BA., Drh. Vincentius Wasisto Pramono, Cicilia Isti Sumiwi, SH., Paulina Titi Chrysti Wulandari, SH., Ir. Mihael Didik Sujarwadi, Dra. Lidya Titi Chrysti Suryani, Akt., Ir. Prihartono, MM., M.I., Titi Chysti Retno Palupi, SH., M. Kes., dr. I Gede Wiryana Patra Jaya, M. Kes. terima kasih atas suasana kebersamaan dan kerukunan, sefrta semangat dan dorongan yang telah diberikan kepada saya.

Akhirnya ucapan terima kasih dan apresiasi yang tinggi saya sampaikan kepada istri tercinta Yustina Titi Chrysti Saptarini. Yang dengan setia selalu mendampingi baik di kala suka maupun duka dan telah memberikan dorongan, inspirasi dalam mengarungi kehidupan bersama dalam keluarga dan di masyarakat. Terima kasih juga kepada anak-anakku terkasih Andanari Putri Saraswati Triwiyono, ST., Sekarayu Putri Tunggadewi Triwiyono SS., yang telah menjadi motivator dan selalu membuat suasana keceriaan dalam keluarga. Saya bangga atas rasa hormat kalian kepada orang tua atau yang lebih dituakan, atas kebersamaan, kerukunan dan canda ria kalian berdua. Semoga kalian nantinya dapat melanjutkan dan meningkatkan kebiasaan baik ini dan semoga selalu sukses dalam mengarungi kehidupan dan dalam berumah tangga. Sekali lagi terima kasih atas supportnya, sehingga hari ini saya dapat menyampaikan pidato pengukuhan di hadapan majelis yang mulia ini.

Akhir kata, kepada bapak ibu yang hadir di majelis yang mulia ini, baik yang berada di ruang Balai Senat Universitas Gadjah Mada, maupun yang mengikuti secara daring atau *livestreaming*, saya mengucapkan terima kasih atas segala atensinya dan memohon doa restu agar dapat meneruskan tugas dan amanah yang dipercayakan kepada saya. Mohon maaf jika dalam penyampaian pidato pengukuhan ini ada kalimat dan tutur kata yang kurang berkenan di hati para hadirin sekalian. Izinkan saya berdoa semoga kita semua menjadi orang-orang

yang berguna bagi sesama dan masyarakat serta untuk kemajuan bangsa dan negara tercinta. Semoga setelah selesai acara ini dan bapak ibu serta saudara/i pulang ke rumah atau tempat lain untuk melanjutkan kegiatan selalu dalam keadaan sehat, selamat dalam perjalanan hingga bertemu keluarga dalam keadaan bahagia. Semoga Tuhan Yang Maha Murah senantiasa melimpahkan rahmat dan berkatNya untuk kita semua. Amin.

Sekian, terima kasih.

*Wassalamu'alaikum warrahmatullahi wabarakatuh.
Syaloom, Om Santi santi santi Om, Nammo budaya, Salam
Kebajikan*

DAFTAR PUSTAKA

- ACI, 2010, Strength Test Results of Concrete ACI 214.4R-10— Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results
- ASCE, 2016, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASCE 7–16, Virginia
- ASTM E8: ASTM International, Standard test methods for tension testing of metallic materials, BS EN ISO 6892-1-2016, BSI Standards Publication, 2016
- BSN, 2002, Tata cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung SNI 1726: 2002
- BSN, 2012, Tata cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726: 2012
- BSN, 2019, Tata cara Perancangan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726:2019
- BSN, 2019, Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan SNI 2847: 2019
- BSN, 2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, SNI 1726:2019
- Bartlett, F. M., and MacGregor, J. G., 1995, “Equivalent Specified Concrete Strength from Core Test Data, Concrete International, Vol. 17, No. 3, Mar.
- Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, 1970, Peraturan Muatan Indonesia 1970, N.I-18, Yayasan dana Normalisasi Indonesia
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Cipta Karya, 1983, Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia Untuk Gedung, PPTGIUG 1983
- Egatama, H.F., Triwiyono, A. dan Sulistyono, D., 2020, Pengaruh Panjang Terlekat Terhadap Kekuatan Lekat Tulangan Pada Beton Sebagai Perkuatan Eksternal (Near-Surface Mounted), Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta

- Elnashai, A.S., Kim, S. J., Yun, G. J., and Sidarta, D., 2007, The Yogyakarta Earthquake on May, 27 2006, Mid-America Earthquake Center University of Illinois at Urbana-Champaign, MAE Center Report N0. 07-02
- Faveryan, I.B., Triwiyono, A., and Siswosukarto, S., 2023, Numerical Modeling Of Applied Near-Surface Mounted on Reinforcement Slab With Abaqus Cae, *Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), April 2023: 78 - 83 DOI: 10.24002/jts.v17i2.6183
- Harrer, A. and Gaudette, P. (2017). Assessment of Historic Concrete Structures. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology* Vol48 No. 4
- Hindo and Bergstrom, 1985, Statistical Evaluation of the In-Place Compressive Strength of Concrete.” *Concrete International* 7 (2, Feb): pp. 44–48.
- Hidayati, N., Priyosulistyo, H., and Triwiyono, A., 2021, Evaluasi dan Retrofit Struktur Gedung Beton Bertulang Akibat Kebakaran, *INERSIA*, Vol. 17, No. 1, Mei 2021
- Irsyam, M., Manif, N.R., Djarwadi, D., and Sarsito, D.A., 2018, , Kajian Gempa Palu Provinsi Sulawesi Tengah 28 September 2018 (M7.4), Tim Pusat Studi Gempa Nasional, Puslitbang Perkim, Kementerian Balitbang PUPR
- Kementerian PUPR, 2017, Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan,
- Laban, N.N. and Triwiyono., A, 2011, Numerical Analysis of Circular Concrete Columns Confined with FRP Sheets Under Concentric Axial Load, *The 3rd International Conference of European Asian Civil Engineering Forum*, 20-22 September 2011
- Nurchasanah, Y., Suhendro, B., and Satyarno, I., 2022, Prospective of Passive Control Structural Devices for Existing Low-Rise Building at Earthquake-Prone Region of Developing Countries: A Literature Review, *Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials*, pp.201-219

- Pemerintah Indonesia, 2020, Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja, Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 245
- Pemerintah Indonesia, 2020, Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2002 Nomor 134
- Pemerintah Indonesia, 2023, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 Tentang Cipta Kerja Menjadi Undang-Undang, Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2022 Nomor 238
- PUPR-JICA, 2009, Buku Saku Persyaratan Pokok Rumah yang Lebih Aman untuk Bangunan Tembok dengan Bingkai Beton Bertulang, The Project on Building Administration and Enforcement Capacity Development for Seismic Resilience, 2009.
- Setyowati, M., 2019, Perkembangan Penggunaan Beton Bertulang di Indonesia Pada Masa Kolonial (1901-1912) The Development of Reinforced Concrete Used In Indonesia During Colonial Period (1901-1942), Berkala Arkeologi, Volume 39 No. 2, November 2019, 201-220
- Satyarno, I, 2010, Evaluasi dan Tindakan Pengurangan Kerentanan Bangunan Dalam Rangka Mitigasi Bencana Gempa, Pidato pengukuhan guru besar Universitas Gadjah Mada pada tanggal 22 Februari 2010 di Yogyakarta
- Sugijopranto, A., Triwiyono, A. and Priyosulistyo, H., 2017, Experimental Investigation on Pre-stressed Polypropylene- band, Procedia engineering, Elsevier, Vol. 171, pp. 1341-1347
- Triwiyono, A., 2006, Perbaikan dan Perkuatan Struktur Beton Pasca gempa dengan FRP, Seminar Nasional dan Lokakarya Perkembangan Standar dan Metodologi Konstruksi Tahan Gempa, 8-9 Juni 2006, Medan Sumatera Utara
- Triwiyono, A. dan Priyosulistyo, H. 2005, Evaluasi Struktur Bangunan Gedung yang Telah Berdiri berdasarkan Peraturan Beton 2002,

- Prosiding Seminar Sosialisasi SK SNI 2002, Yogyakarta, 7 Mei 2005.
- Triwiyono, A. and Eratodi, I.G.L.B., 2019, Investigation of brick masonry with using of bad quality of bricks and reinforced concrete frame, MATEC Web of Conferences 258, 04008
- Triwiyono, A., Han, A.L., Aryanto, A., Tadjono S., and Gan B.S., 2020, Effect of specimen gauge reduction on uniaxial tension properties of reinforcing steel, Journal of Iron Steel Research International (2020) 27:964–971
- Triwiyono, A., Neo, F., Ardinta, J., Pratama, G.M., and Sugijoprano, A., 2016, Experimental Investigation on the Flexural Performance of Brick Masonry Wall Retrofitted using PP-Band Meshes under Cyclic Loading, Applied Mechanics and Materials, Trnas Tech Publication, Switzerland, Vol. 845, pp 132-139
- Triwiyono, A., Nugroho, A.S.B., Firstyadi, A.D., and Ottama, F., 2015, Flexural Strength and Ductility of Concrete Brick Masonry Wall Strengthened Using Steel Reinforcement, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125 (2015) 940 –947
- Usman, W., 2020, Perilaku Low-Cost Base Isolator Dengan Karet Lokal Inovatif Untuk Rumah Tinggal Sederhana, Disertasi pada Fakultas Teknik Program Doktor Ilmu Teknik Sipil Universitas Tarumanagara
- Wardah, N., Triwiyono, A., and Muslikh, 2012, the Flexural Behavior in Perpendicular Direction of Concrete Brick Walls with Wiremesh Reinforcement and their Application for Simple Houses, The 1st International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction, Yogyakarta, September 11 - 13, 2012

BIODATA



Nama : Prof. Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono, IPU.
 Tempat, Tgl Lahir : Sragen, 4 Februari 1962
 NIP : 1962 0204 1988 03 1001
 Pangka : Pembina
 Golongan : IVa
 Jabatan : Guru Besar
 Unit Kerja : Fakultas Teknik, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan
 Alamat Kantor : Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, FT UGM, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281
 Alamat Rumah : Jl. Nglempongsari Raya NG I 68/RT 79 RW 27 Ds. Sariharjo, Kec. Ngaglik, Kab Sleman 55581
 Keluarga : Yustina Titi Chrysti Saptarini (istri)
 Andanari Putri Saraswati Triwiyono, ST. (anak)
 Sekarayu Putri Tunggadewi Triwiyono, SS. (anak)

Riwayat Pendidikan

1969 – 1974 SD Negeri Patihan 2 Kec Sidoharjo Kab. Sragen
 1975 – 1977 SPM Negeri 1 Sragen
 1978 – 1981 SMA Negeri 3 Surakarta
 1981 – 1987 S1 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik UGM
 1991 – 1996 S3 Bauingenieurwesen Gesamthochschulke Kassel Universitaet, Jerman (Dr.-Ing.)

Pelatihan dan Profesi

- 2023 Pelatihan Calon Penilai Ahli, Kementerian PUPR, Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi (LPJK)
- 2023 Ahli Teknik Bangunan Gedung, Badan Nasional Sertifikasi Profesi
- 2021 Insinyur Profesional Utama (IPU), Persatuan Insinyur Indonesia (PII)
- 2018 Insinyur (Ir.), Program Studi Program Profesi Insinyur (PSPPI) Fakultas Teknik UGM
- 2015 Current Trend of Design and Construction in Steel Structures, The Japanese Society of Steel Construction (JSSC)
- 2012 Construction Methods and Community Awareness in Residential Building, Puskim PUPR-JICA
- 1997 The International Advanced Course on Earthquake Disaster Prevention for Building Engineers, Japan International Cooperation Agency (JICA)
- 1995 Nonlinear Finite Element Method, Hamburg Germany

Riwayat Pekerjaan

1. Ketua Program Magister Program Studi Teknik Sipil DTSL FT UGM (2016 – 2020 dan 2021 - sekarang)
2. Kepala Laboratorium Teknik Struktur DTSL FT UGM (2012 - 2015)
3. Ketua Program Magister Pengelolaan Sarana Prasarana DTSL FT UGM (2012 - 2015)
4. Ketua Program Kelas Khusus Teknik Struktur Program S2 Teknik Sipil DTSL FT UGM (2009 - 2011)
5. Dosen di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, FT UGM (1988 - sekarang)

Kegiatan lain di Bidang Sosial dan Pendidikan

- 2008 – 2020 Pengurus Yayasan Slamet Rijadi Yogyakarta (Badan hukum yang mengelola Universitas Atma Jaya Yogyakarta)

2021 – sekarang Ketua Umum Pengurus Yayasan Slamet Rijadi Yogyakarta

Penghargaan

- Satyalancana Karya Satya X Tahun dari Presiden RI 2003
- Satyalancana Karya Satya XX Tahun dari Presiden RI 2012
- Piagam Penghargaan Kesetiaan 25 Tahun dari Rektor UGM 2016

Publikasi Terpilih dalam 5 Tahun Terakhir

1. S. Siswosukarto, Muslikh, **A. Triwiyono**, A., and D. Sulistyono, 2024, Construction of Rumah Kotangan as Transitional Shelter for the Victims of Yogyakarta's Earthquake Disaster, Global Forum on Disaster Solutions (GFDS), Two Decades Post Aceh - Indonesia's Earthquake and Tsunami February 21 - 23, 2024, Yogyakarta – Indonesia
2. M.K. Akbar, A. Awaludin, dan **A. Triwiyono**, 2024, Studi Eksperimental dan Analisis Empirik Performa Sambungan Sistem Lantai Komposit Cold Formed Steel-Plywood, Proceeding Civil Engineering Research Forum, Vol. 3, No. 2, Februari 2024, pp. 207-217
3. R.R. Dewi, **A. Triwiyono** dan H. Priyosulistyo, 2024, Penilaian Kondisi Jembatan Menggunakan BMS, BCR dan AHP untuk Menentukan Rekomendasi Penanganan, Prosiding Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur, Yogyakarta, 18 Januari 2024
4. K. Utami, **A. Triwiyono**, A. Aminullah, 2024, Aplikasi Nilai Kondisi *Overpass* dengan Metode BCR pada Evaluasi Ekonomi di Ruas Tol Solo - Ngawi - Kertosono KM 503+900 - KM 645+400, Prosiding Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur, Yogyakarta, 18 Januari 2024
5. H. Muhammad, A. Saputra, **A. Triwiyono**, 2023, Experimental Study on the Performance of Mechanical Coupler Splice Made of Rebar Under Monotonic Loading, Semesta Teknika, Vol. 26, No. 2, November 2023, 168 - 180
6. K.A. Kafie, **A. Triwiyono**, and I. Satyarno, Hsuan-Teh Hu, 2023, Seismic Performance Evaluation of Wharf Based on ASCE 61-14,

- Journal of the Civil Engineering Forum, September 2023, 9(3):277-286
7. I.B. Faveryan, **A. Triwiyono**, and S. Siswosukarto, 2023, Numerical Modeling of Applied Near-Surface Mounted on Reinforcement Slab with Abaqus Cae, Jurnal Teknik Sipil, 17(2), April 2023: 78 – 83
 8. M.N. Widodo, **A. Triwiyono**, dan H.C. Hardiyatmo, 2023, Pengaruh Pengisian Beton dan Penambahan Tulangan untuk Perkuatan Spun Pile Terhadap Kekuatan Dan Daktilitas Lentur, Proceeding Civil Engineering Research Forum, Vol. 3, No. 1, Juli 2023
 9. E.W. Pradana, **A. Triwiyono**, and A. Awaludin, S. Mandal, 2022, Increasing the Inventory Rating Factor of Steel Truss Bridge Through Orthotropic Steel Deck Panel Application, Journal of the Civil Engineering Forum, September 2022, 8(3): 291-300
 10. A.R. Ikhwanti, **A. Triwiyono**, dan I. Satyarno, 2021, Tinjauan Studi Kinerja Seismik Plafon Secara Numerik Dan Uji Shaking Table, Prosiding CEEDRiMS 2021 Inovasi Teknologi dan Material Terbaru Menuju Infrastruktur Yang Aman Terhadap Bencana dan Ramah Lingkungan, pp. 379-386
 11. D.R. Mahendra and **A. Triwiyono**, 2021, The Estimation Modeling of Abutment Volume with Variations of Bridge Span, Abutment Height, and Seismic Zone, Journal of Civil Engineering Forum, January 2021, 7(1): 01-12
 12. N. Hidayatia, H. Priyosulistyo, and **A. Triwiyono**, 2021, Evaluasi dan Retrofit Struktur Gedung Beton Bertulang Akibat Kebakaran, INERSIA, Vol.17, No. 1, Mei 2021
 13. H. Kristiyanto, **A. Triwiyono**, Muslikh and A. Saputra, 2021, The Behavior of the Welding Connection Models Between Reinforcing Steel and Steel Plate, International Journal of GEOMATE, Sept., 2020, Vol.19, Issue 73, pp. 156–162
 14. B. Supriyadi, S. Siswosukarto, Muslikh and **A. Triwiyono**, 2020, Economic Review of Variation of Prestressed Girder Length On Bridge Construction Practices, International Journal of GEOMATE, Dec., 2020, Vol.19, Issue 76, pp. 165–172,

15. Ngudiyono, B. Suhendro, A. Awaludin and **A. Triwiyono**, Compressive and Tensile Creep of Glued-Laminated Bamboo, Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur Abad ke-21, Yogyakarta, 25-26 Januari 2021
16. **A. Triwiyono**, A., I.G.L.B. Eratodi, D.E. Wibowo, 2020, and Suprpto Siswosukarto Investigation of Confined Masonry Using Non-standard Quality of Concrete and Reinforcement Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, pp.201-219.
17. **A. Triwiyono**, A.L. Han, A. Aryanto, S. Tadjono, and B.S. Gan, 2020, Effect of Specimen Gauge Reduction On Uniaxial Tension Properties of Reinforcing Steel, Journal of Iron and Steel Research International, Volume 27 Number 8
18. J.J. Sudjati, I. Satyarno, and **A. Triwiyono**, B. Supriyadi, and A.F. Setiawan, 2020, The Application of Inserted Steel Pipe as an Alternative Confinement Design in Reinforced Concrete Column Plastic Hinge Regions, Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Lecture Notes in Civil Engineering Volume 215.
19. M. Sufaat, A. Awaludin, I. Satyarno, **A. Triwiyono**, A. Aminullah, M. Sunarso, and G. M. Adityawarman, 2020, Finite Element Analysis of CRTS III Slab Track Model, International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Lecture Notes in Civil Engineering Volume 215.
20. **A. Triwiyono** and I.G.L.B. Eratodi, 2019, Investigation of brick masonry with using of bad quality of bricks and reinforced concrete frame, MATEC Web of Conferences 258.
21. S. Linggar, A. Aminullah, and **A. Triwiyono**, 2019, Analysis of Building and Its Components Condition Assessment Case Study of Dormitory Buildings, MATEC Web of Conferences 258, 0 (2019)
22. M. F. Darmawan, S. A. Fajar, A. Saputra, **A. Triwiyono**, dan Ali Awaluddin, 2019, Analisis Perkuatan Struktur Truss Baja Penopang Suatu Ballroom Bentang Panjang dengan Metode

External-Post Tensioning, Civil Engineering and Environmental Symposium 2019

23. H. Kristianto, **A. Triwiyono**, Muslikh, and A. Saputra, 2019, Beam-to-Beam Connection of Precast Concrete Structures: State of the Art, MATEC Web of Conferences 258, 0 (2019),
24. A.N.A Dewi, I. Ujike, **A. Triwiyono**, 2019, Quality Change on The Air Permeability of High Strength Concrete Subjected to Elevated Temperature History, Civil Engineering and Environmental Symposium 2019 Semarang, 1 Mei 2019
25. F.A.R. Utami, **A. Triwiyono**, N.K.A. Agustini, and I. Perdana, 2019, Thermal Conductivity of Geopolymer with Polypropylene Fiber, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 742 (2020) 012031 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/742/1/012031