



No. 02 / P/ BM/ 2022

PEDOMAN

Bidang Jalan dan Jembatan

PEMBAHASAN PENYELENGGARAAN KEAMANAN JEMBATAN KHUSUS

SALINAN



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA

PRAKATA

Pedoman Pembahasan Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Khusus mencakup ketentuan umum dan ketentuan teknis, dimana di dalam ketentuan umum memuat kualifikasi dan kewajiban Perencana dan Penanggung Jawab Perencanaan, penggunaan *software*, rekomendasi dari otoritas lain dan ketentuan teknis memuat persyaratan teknis dalam pembahasan dengan Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan (KKJTJ).

Acuan yang digunakan pada Pedoman ini mengacu pada ketentuan yang ada pada standar, pedoman, dan manual yang diterbitkan baik oleh Direktorat Jenderal Bina Marga maupun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat serta *code* atau standar yang berlaku yang berkaitan dengan perencanaan, pelaksanaan hingga preservasi jembatan khusus.

Pedoman ini disusun oleh KKJTJ melalui Balai Jembatan, Direktorat Pembangunan Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Pedoman ini telah dibahas dalam rapat pembahasan pada tanggal 27 September 2021 di Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan. Yang dihadiri oleh para pemangku kepentingan (*stakeholder*) terkait, yaitu perwakilan dari KKJTJ, Balai Jembatan, Direktorat Pembangunan Jembatan dan Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan.

Pedoman ini diharapkan sebagai pegangan dan petunjuk bagi perencana, pembangun, pengelola jembatan khusus pada waktu pembahasan perancangan, pelaksanaan, serta operasional dan preservasi konstruksi jembatan khusus.

Jakarta, Februari 2022
Direktur Jenderal Bina Marga,



Hedy Rahadian

DAFTAR ISI

PRAKATA	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
PENDAHULUAN	v
1. Ruang Lingkup	1
2. Acuan Normatif	1
3. Istilah dan Definisi	3
4. Ketentuan Umum	5
5. Ketentuan Teknis	7
Bibliografi	39
Daftar Penyusun dan Unit Kerja Pemrakarsa	40

SALINAN

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai R berdasarkan tipe bangunan bawah.....	10
Tabel 2. Batas izin defleksi	13
Tabel 3. Persyaratan <i>balanced stiffness</i>	15
Tabel 4. Suhu pengujian pengetesan isolator elastomerik.....	20

SALINAN

PENDAHULUAN

Direktorat Jenderal Bina Marga berupaya untuk meningkatkan ketertiban dalam penyelenggaraan dan peningkatan keamanan jembatan khusus diperlukan penanganan khusus terhadap keamanan jembatan, yaitu memberikan jaminan keamanan jembatan dan terlindunginya masyarakat beserta harta benda di sekitar jembatan oleh potensi resiko kegagalan konstruksi dan/atau kegagalan bangunan. Kondisi penyelenggaraan jembatan khusus yang dituju didasarkan pada saat perencanaan yang telah dijalankan di berbagai negara, dengan tujuan untuk meningkatkan efektifitas, efisiensi, serta tepat mutu, waktu, serta biaya dalam pelaksanaan pekerjaan jembatan khusus.

Pedoman ini merupakan salah satu bentuk komitmen Direktorat Jenderal Bina Marga dalam penyelenggaraan jembatan khusus di seluruh Indonesia, tidak hanya yang terdapat di Jalan Nasional.

Menyesuaikan dengan kebutuhan mendesak saat ini, pedoman ini sebagai pegangan dan petunjuk bagi perencana, pembangun, pengelola jembatan khusus pada waktu pembahasan perancangan, pelaksanaan, serta operasional pemeliharaan konstruksi jembatan khusus.

Pedoman Pembahasan Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Khusus

1. Ruang Lingkup

Pedoman Pembahasan Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Khusus ini menjelaskan hal-hal yang berkaitan dengan perancangan, pelaksanaan, serta operasional pemeliharaan konstruksi jembatan khusus termasuk laporan bagi perencana, pembangun, pengelola jembatan khusus pada waktu pembahasan dengan KKJTJ.

Lingkup tugas dan fungsi KKJTJ antara lain:

- a. Melakukan pengkajian terhadap evaluasi keamanan jembatan dan terowongan jalan yang dilakukan oleh pembangun atau pengelola jembatan dan terowongan jalan;
- b. Memberikan rekomendasi mengenai keamanan jembatan dan terowongan jalan; dan
- c. Menyelenggarakan inspeksi jembatan dan terowongan jalan.

2. Acuan Normatif

Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2004 Nomor 132, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4444).

Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 245, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 6573).

Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2021 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2020 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 24, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 6626).

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 19/PRT/M/2011 tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2011 Nomor 900).

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 41/PRT/M/2015 tentang Penyelenggaraan Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 1422).

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 10 Tahun 2021 tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 286).

Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM.60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.

Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor 08 Tahun 2020 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pesawat Angkat dan Pesawat Angkut (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 609).

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 07/SE/M/2015 tentang Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan.

Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Nomor 14/SE/M/2015 tentang Pedoman Pemasangan Baut Jembatan.

Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Nomor 24/SE/M/2015 tentang Pedoman Perencanaan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan.

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 05/SE/Db/2017 tentang Perubahan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor Um.1.03-Db/242 tentang Penyampaian Ketentuan Desain dan Revisi Desain Jalan dan Jembatan, serta Kerangka Acuan Kerja Pengawasan Teknis untuk Dijadikan Acuan di Lingkungan Ditjen Bina Marga.

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 17/SE/Db/2017 tentang Penyampaian Perubahan *Bridge Management System* (BMS) Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan Volume 1 (*Bridge Design Code Section 3, 4 & 5*).

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 18/SE/Db/2017 tentang Penyampaian Perubahan *Bridge Management System* (BMS) Panduan Perencanaan Jembatan Volume 2 (*Bridge Design Code Section 8, 9 & 10*).

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2019 tentang Panduan Teknik Pelaksanaan Jembatan Tahun 2019.

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 04/SE/Db/2020 tentang Panduan Teknis Evaluasi Struktur Jembatan untuk Dispensasi Penggunaan Jalan yang Memerlukan Perlakuan Khusus.

Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 16.1/SE/Db/2020 tentang Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2).

SNI 03-2849-1992, Tata cara pemetaan geologi teknik lapangan.

SNI 1724:2015, Analisis hidrologi, hidraulik, dan kriteria desain bangunan di sungai.

SNI 2415:2016, Tata cara perhitungan debit banjir.

SNI 1725:2016, Pembebanan untuk jembatan.

SNI 2833:2016, Perencanaan jembatan terhadap beban gempa.

SNI 2052:2017, Baja tulangan beton.

SNI 8460:2017, Persyaratan perancangan geoteknik.

Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, ISBN 978-602-5489-01-3, Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (*apabila Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 memberikan nilai respons spektra yang lebih besar*).

Manual Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 016/BM/2011 tentang Pemeliharaan Jembatan Suspensi.

Manual Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 004/BM/2012 tentang Pelaksanaan Pengujian Jembatan.

Manual Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 004/M/BM/2013 tentang Analisa Gerusan Lokal pada Jembatan dan Tipikal Penanganannya.

Standar Operasional Prosedur Direktur Jenderal Bina Marga tentang Penggantian Landasan Karet Jembatan, November 2009.

Spesifikasi Khusus yang telah disetujui Direktur Jenderal Bina Marga SKh-1.7.17 tentang Spesifikasi Khusus Interim Fondasi Tiang Bor Sekan.

Spesifikasi Khusus yang telah disetujui Direktur Jenderal Bina Marga SKh-1.7.42 tentang Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) Jembatan.

Spesifikasi Khusus yang telah disetujui Direktur Jenderal Bina Marga SKh-1.7.47 tentang Spesifikasi Khusus Interim Isolator Gempa Menggunakan Bantalan Karet Inti Timbal (*Lead Rubber Bearing, LRB*) untuk Jembatan.

3. Istilah dan Definisi

3.1 AASHTO

American Association of State Highway and Transporting Official

3.2 ASTM

American Society for Testing and Material

3.3 BJTD

Baja Tulang *Deform* adalah jenis besi beton bertekstur kasar

3.4 BJTS

Baja Tulangan Beton Siri

3.5 DIN

Deutsche Industrie Norm

3.6 EN

European Standards

3.7 FHWA

Federal Highway Administration

3.8 IO pada Analisis *Pushover*

Immediate Occupancy

3.9 KKJTJ

instansi yang bertugas membantu Menteri dalam penanganan keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan

3.10 LPJK

Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi

3.11 LRFD

Load And Resistance Factor Design

3.12 LS pada Analisis *Pushover*

Life Safe

3.13 Pemilik/Pengelola jembatan

pejabat yang berwenang dan bertanggungjawab dalam menyelenggarakan pembangunan jembatan (perencanaan teknis, pelaksanaan konstruksi, evaluasi keamanan, dan

kesiapsiagaan tindak darurat), pengelolaan jembatan (operasi, preservasi, pemantauan, evaluasi keamanan, dan kesiapsiagaan tanggap darurat), inspeksi jembatan, dan pelaporan hasil inspeksi jembatan kepada KKJTJ.

3.14 SNI

Standar Nasional Indonesia

4. Ketentuan Umum

4.1 Perencana Jembatan

4.1.1 Kualifikasi Perencana dan Penanggung Jawab Perencanaan

Kualifikasi Perencana dan Penanggung Jawab Perencanaan:

- a. Ketua Tim (*Team Leader*) bertanggung jawab secara keseluruhan terhadap pelaksanaan perencanaan, minimal wajib memiliki Sertifikat Keahlian (SKA) yang diterbitkan oleh LPJK dan/atau lembaga asosiasi yang terakreditasi serta memiliki pengalaman sebagai team leader selama 5 (lima) tahun di bidang jembatan;
- b. Penanggung jawab perencanaan bidang struktur, geoteknik, keairan, atau geologi wajib memiliki minimal SKA Madya bidang terkait dan memiliki pengalaman yang mendukung pada bidang terkait minimal 5 tahun;
- c. Tenaga ahli adalah pelaksana perencanaan bidang struktur, geoteknik, keairan, atau geologi wajib memiliki minimal SKA Madya bidang terkait dan memiliki pengalaman yang mendukung pada bidang terkait minimal 5 tahun;
- d. Ketua Tim dan penanggung jawab perencanaan wajib menandatangani dokumen perencanaan;
- e. Ketua Tim, penanggung jawab perencanaan, dan tenaga ahli terkait wajib hadir dalam pembahasan/presentasi di KKJTJ;
- f. Ketua Tim, penanggung jawab perencanaan, dan tenaga ahli harus paham terhadap perubahan peraturan-peraturan terbaru (SNI, pedoman, kriteria, dan *code* yang relevan);
- g. Ketua Tim harus memahami konsep dasar antara lain struktur, geoteknik, geologi, aerodinamika, kegempaan, keairan, material, lingkungan, pemeliharaan, pengaruh terhadap struktur eksisting, dan bidang-bidang lain terkait;
- h. Ketua Tim, penanggung jawab perencanaan, dan tenaga ahli harus memahami metode pelaksanaan, peralatan, dan keselamatan konstruksi;
- i. Penanggung jawab perencanaan dan tenaga ahli wajib mengerti kapabilitas program bantu (*software*) dalam perhitungan struktur, geoteknik, geologi, aerodinamika, dan keairan;

- j. Ketua Tim harus dapat mengintegrasikan semua disiplin ilmu yang terlibat dalam perencanaan.

4.1.2 Kewajiban Perencana dan Penanggung Jawab Perencanaan

Ketua Tim, penanggung jawab perencanaan, dan tenaga ahli wajib mengikuti keputusan sidang KKJTJ.

4.2 Penggunaan Software

Dalam penggunaan *software* untuk perhitungan harus memperhatikan hal sebagai berikut:

- a. Perhitungan wajib menggunakan *software* berlisensi yang sesuai dan diakui secara nasional maupun internasional;
- b. Perencana wajib menyerahkan data *input* dan *output* perhitungan dalam bentuk *softcopy*, untuk keperluan pengecekan termasuk *building information modelling*;
- c. Perencana wajib menyerahkan informasi lainnya terkait dengan *Building Information Modelling* (BIM) yang dikelola oleh Direktorat Jenderal Bina Marga;
- d. Rancangan jembatan yang memerlukan penanganan khusus diharuskan menggunakan dua *software* yang berbeda.

4.3 Rekomendasi dari Otoritas Lain

Izin atau rekomendasi diperlukan dari otoritas lain dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi, diantaranya menyangkut dalam hal:

- a. Ruang bebas vertikal;
- b. Ruang bebas horizontal;
- c. Ruang bebas terhadap infrastruktur lainnya;
- d. Persoalan Keairan (antara lain: persilangan dengan sungai, saluran irigasi, kebutuhan drainasi, ruang transportasi air, degradasi dan agradasi dasar serta erosi tebing sungai, perubahan morfologi sungai, banjir dan pasang surut, kemungkinan terjadinya tsunami, dan lain-lain);
- e. Izin peledakan;
- f. Batasan ketinggian struktur terkait jalur penerbangan;
- g. Izin penggunaan lahan;
- h. Izin lainnya terkait peraturan daerah yang ada.

5. Ketentuan Teknis

5.1 Perencanaan Jembatan

Ketentuan atau peraturan SNI yang dibutuhkan sebagai dasar perencanaan jembatan tidak tersedia, maka perencana dapat menggunakan peraturan dan standar terakhir yang dikeluarkan oleh negara lain, yang sudah diakui secara internasional dan dapat dipertanggungjawabkan, antara lain:

- a. *AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition 2014 Interim;*
- b. *AASHTO Guides Specification for Seismic Isolation Design, 4th Edition 2014;*
- c. *AASHTO/AWS D 1.5 M/D 1.5 Bridge Welding Code 2015;*
- d. *AASHTO M251-2016 Standard Specification for Plain and Laminated Elastomeric Bridge Bearings;*
- e. *AASHTO LRFD Bridge Construction Specification 2017;*
- f. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition 2020;*
- g. *AISC American Institute of Steel Construction Manuals 15th Edition 2017;*
- h. *British Standard CD363 Design Rules for Aerodynamics Effects on Bridge 2020;*
- i. *CalTrans Seismic Design Criteria 2013;*
- j. *DIN 18800 Out of Plane Buckling and in-Plane Buckling for Arch Bridge 2008;*
- k. *EN 15129 Anti Seismic Devices 2018;*
- l. *FHWA 2012 Hydraulic Design of Safe Bridges;*
- m. *JIS H 0401:2007 Test Methods for Dip Galvanized Coatings.*

Penggunaan ketentuan lain yang tidak tercakup di atas, dapat digunakan setelah mendapatkan persetujuan KKJTJ.

Jika terdapat ketentuan di dalam peraturan dan standar yang berpotensi menimbulkan ketidaksepakatan, maka perlu mendapatkan rekomendasi KKJTJ.

5.1.1 Dokumen Perencanaan

Perencana wajib menyerahkan dokumen perencanaan melalui Pemilik/Pengelola Jembatan kepada KKJTJ pada tahap desain/perencanaan jembatan, yang memuat diantaranya:

- a. Survei dan investigasi, yang meliputi antara lain (sesuai kebutuhan):
 - 1) topografi (dan bathimetri);
 - 2) klimatologi;
 - 3) geologi;
 - 4) geologi teknik;
 - 5) geoteknik;

- 6) *site specific seismic hazard analysis*, khusus untuk *site class* sf atau berada di daerah *near fault*, atau konstruksi jembatan yang monumental;
 - 7) hidrologi;
 - 8) hidrogeologi;
 - 9) keairan, termasuk kualitas air sungai;
 - 10) karakteristik angin;
 - 11) data lingkungan yang akan mempengaruhi kinerja struktur;
 - 12) data lain tambahan yang terkait dalam perencanaan yang diputuskan dalam sidang kkjtj.
- b. Kriteria desain, termasuk antara lain:
- 1) standar dan pedoman yang dijadikan acuan;
 - 2) spesifikasi material;
 - 3) beban-beban yang bekerja dan kombinasinya;
 - 4) *safety factor* dan batasan deformasi;
 - 5) keselamatan konstruksi, keberlanjutan konstruksi, dan keselamatan pada masa operasi dan preservasi termasuk memperhitungkan kebutuhan akses inspeksi jembatan. Contohnya adalah jalan untuk inspeksi, tangga, *lift*, *crane*, dan *gantry*.
- c. Desain detail, diantaranya:
- 1) perhitungan *staging* pelaksanaan termasuk stabilitas sesuai metode konstruksi;
 - 2) rencana instrumentasi dan pemantauan (diantaranya untuk penurunan permukaan, kondisi lingkungan);
 - 3) rencana pengujian (*loading test*, *trial assembly*, *mock up*);
 - 4) daya dukung dan penurunan fondasi;
 - 5) penulangan, *detailing* seismik, sambungan, dan sejenisnya.
- d. Analisis struktur dan kelengkapan jembatan:
- 1) analisis struktur jembatan mencakup antara lain geometri, aerodinamika (apabila diperlukan), struktur atas, struktur bawah, fondasi, dinding penahan, bangunan pelengkap dan bangunan keairan;
 - 2) apabila dibutuhkan analisis desain berbasis kinerja (*performance based design*), maka perlu dilakukan analisis dinamis non-linear dan/atau *pushover analysis*. analisis tersebut tergantung masalah yang ditinjau, termasuk perlu tidaknya *soil structure interaction*, dengan memperhitungkan sifat *non-linearity* tanah;

- 3) keadaan khusus
 - a) apabila *transport* sedimentasi sungai berupa aliran dengan sedimen berbatu yang dapat merusak struktur (ukuran *gravel*, *boulder*, *couple*, dan campurannya), maka perlu analisis proteksi/perlindungan terhadap fondasi, *pile cap*, dan lain-lain;
 - b) apabila fondasi menggunakan *bored pile* dengan kedalaman > 45 m dan berpijak pada lapisan pasir, disarankan untuk dilakukan tinjauan menggunakan *based* dan/atau *skin grout*;
 - c) analisa *scouring*;
 - d) analisa pengaruh hanyutan yang dibawa oleh aliran sungai.
- 4) penetapan nilai R arah memanjang dan melintang untuk struktur bawah dan fondasi.
- e. Dimensi tiap elemen struktur jembatan;
- f. Spesifikasi teknis dan khusus yang harus dipenuhi untuk mencapai kualitas pekerjaan yang disyaratkan dan spesifikasi peralatan utama yang dipergunakan dalam pelaksanaan konstruksi;
- g. Rencana *mechanical* dan *electrical*;
- h. Gambar detail teknis hasil perencanaan;
- i. Metode konstruksi yang meliputi pelaksanaan tiap tahapan dan batasan waktu serta pesawat angkat dan angkut yang direncanakan;
- j. Rancangan konseptual SMKK (Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi) untuk konsultan, dokumen telaah tentang keselamatan konstruksi;
- k. Perencanaan SHMS (*Structural Health Monitoring System*);
- l. Konsep operasi dan preservasi.

5.1.2 Kelas Keutamaan Jembatan

- a. Kategori Penting adalah Jembatan *multi span*/berbentang banyak yang melintasi selat atau laut;
- b. Kategori Sangat Penting adalah Jembatan yang merupakan akses satu-satunya ke suatu wilayah;
- c. Di luar yang disebutkan di atas dan standar yang berlaku, maka harus didiskusikan dengan otoritas terkait.

5.1.3 Persyaratan Material Jembatan

Persyaratan material yang digunakan untuk pembangunan jembatan harus sesuai dengan standar dan peraturan yang berlaku, secara khusus dijelaskan sebagai berikut:

- a. Beton
 - 1) Harus memenuhi syarat-syarat *durability*, kekuatan, daya layan, *workability* sesuai standar yang ada;
 - 2) Material untuk *linkslab* agar menggunakan beton fiber atau ECC (*Engineered Cementitious Composite*) yang memiliki ketahanan tinggi terhadap retak.
- b. Baja Struktur
Harus memenuhi syarat-syarat kuat leleh, ultimit, daktilitas, dan *impact* sesuai standar yang ada.
- c. Baja Tulangan
Baja tulangan BJTD/BJTS50 atau lebih besar tidak diperkenankan untuk digunakan sebagai tulangan pada elemen-elemen pendisipasi energi seperti pilar (*pier*) kolom, *pier* dinding, *abutment*, atau struktur bawah lainnya.
- d. Baut
Baut yang digunakan harus mutu tinggi, minimum setara dengan *grade* 8.8 yang setara dengan ASTM A325, dengan koefisien friksi yang di-*backup* oleh spesifikasi teknis pelaksanaan yang mengharuskan kontraktor melakukan uji friksi laboratorium sesuai kondisi lapangan. Bilamana menggunakan baut dengan *grade* 10.9 (F10T) ke atas, tidak diperbolehkan perlakuan HDG (*Hot Dip Galvanized*).

5.1.4 Faktor Modifikasi *Response* (R)

- a. Faktor modifikasi *response* untuk bangunan bawah dapat mengacu pada tabel di bawah ini, sesuai dengan tipe bangunan bawah terhadap *operational category*;
- b. Pilar tipe dinding dapat didesain sebagai kolom tunggal pada arah sumbu lemahnya;
- c. Nilai R untuk tiang *spun pile* pada *slab on pile* atau *pile bent* maksimum adalah 3 (untuk kategori lainnya, sesuai Tabel 1 dengan catatan, tiang yang berfungsi sebagai *pile bent* dengan R = 3 harus memenuhi syarat *detailing pile bent* yang ditetapkan dalam AASHTO LRFD 2017 sesuai zona gempa terkait);

Tabel 1. Nilai R berdasarkan tipe bangunan bawah

Bangunan Bawah	Operational Category		
	Critical	Essential	Other
Pilar tipe dinding – dimensi terbesar	1,5	1,5	2,0
<i>Spun Pile</i> pada <i>Slab on Pile</i> dan/atau <i>Pile bents</i> struktur beton:			
• Hanya tiang vertikal	1,5	2,0	3,0
• Dengan tiang miring	1,5	1,5	2,0

Bangunan Bawah	Operational Category		
	Critical	Essential	Other
Kolom tunggal	1,5	2,0	3,0
<i>Spun Pile</i> pada <i>Slab on Pile</i> dan/atau <i>Pile bents</i> baja dan komposit:			
• Hanya tiang vertikal	1,5	3,5	5,0
• Dengan tiang miring	1,5	2,0	3,0
Kolom/ <i>pier</i> majemuk	1,5	3,5	5,0

- d. Bilamana menggunakan tiang *spun pile* yang umum (tidak *special order*) sebagai *pile bent* maka nilai R maksimum adalah 1,5;
- e. Untuk zona gempa 3 dan 4, nilai R untuk fondasi dapat diambil sama dengan satu atau ditetapkan berdasarkan pendekatan desain kapasitas. Kekuatan struktur fondasi harus selalu lebih besar daripada kapasitas *pier* yang paling mungkin.

5.1.5 Kombinasi Beban LRFD, Layan, Fatik, serta ASD

- a. Kombinasi beban LRFD (kekuatan), layan, dan fatik agar mengacu pada SNI 1725:2016;
- b. Kombinasi beban fatik infinit dapat diterapkan dengan mengganti faktor beban hidup pada kombinasi beban fatik finit di SNI 1725:2016 dari 0,75 menjadi 1,5;
- c. Kombinasi beban fatik hanya melibatkan beban hidup lalu lintas dan beban *impact*;
- d. Kombinasi beban ASD tanpa gempa untuk perancangan kebutuhan fondasi dapat menggunakan kombinasi layan I berdasarkan SNI 1725:2016;
- e. Kombinasi beban ASD ditambah gempa untuk perancangan kebutuhan fondasi dapat menggunakan kombinasi ekstrem I berdasarkan SNI 1725:2016, dengan menerapkan faktor beban 0,7 disetiap beban EQ;
- f. Beban gempa pada kombinasi LRFD (kekuatan) dan ASD haruslah diterapkan secara *orthogonal*, dengan proporsi 100% dan 30% di masing-masing arah lateral.

5.1.6 Aspek Geoteknik dan Fondasi

5.1.6.1. Site Class/Kelas Situs

- a. Penentuan situs tanah didasarkan standar yang ada;
- b. Kondisi khusus atau di luar standar harus dibahas dengan KKJTJ.

5.1.6.2. Tanah dan Batuan Bermasalah Potensi Likuifaksi dan Bahaya Geoteknik Lainnya (tambahan aspek geologi: patahan, *land subsidence*, *problematic soil*, dan lain-lain)

- a. Tanah dan batuan yang bermasalah diantaranya adalah yang berpotensi likuifaksi, berpotensi *land subsidence*, berada di dekat sesar, *clay shale* dan/atau *friabled mudstone*, berada di zona karst, tanah dan batuan ekspansif, *squeezing*, serta tanah gambut, harus ditinjau pengaruhnya terhadap stabilitas struktur;
- b. Perlu dilakukan analisis potensi likuifaksi untuk tanah non-kohefif yang berada pada kedalaman hingga 15 m dari permukaan tanah berdasarkan data tanah lapangan (N-SPT dari pemboran dan uji sondir (CPT) dan laboratorium (gradasi butiran dan *Atterberg limit*) dengan menggunakan nilai percepatan gempa di permukaan tanah sesuai standar SNI;
- c. Apabila tanah pada butir b tersebut di atas berpotensi mengalami likuifaksi, maka perlu ditinjau:
 - 1) berkurangnya kuat geser dari tanah;
 - 2) penurunan tanah;
 - 3) *flow failures*;
 - 4) *lateral spreading*;
 - 5) instabilitas lereng akibat likuifaksi;
 - 6) usulan penanggulangan (apabila diperlukan).
- d. Perlu ditinjau potensi terjadi kerusakan tanah permukaan, maka akibat potensi likuifaksi ini perlu dihitung dalam perhitungan daya dukung dan deformasi, serta perbaikan dan perkuatan fondasinya dengan metode yang tersedia. Misalnya dengan metode numerik, metode Ishihara (1985), ataupun dengan metode lain yang disepakati KKJTJ.

5.1.6.3. Faktor Keamanan

Safety factor minimum daya dukung fondasi berdasarkan kombinasi ASD diatur sebagai berikut:

- a. Kondisi Tanpa Gempa : 2.5
- b. Kondisi Gempa : 1.6

5.1.6.4. Defleksi Izin Struktur Fondasi

- a. Defleksi lateral tiang (fondasi/*pile cap*) pada permukaan tanah/*sea bed/river bed* dalam perencanaan dibatasi sebagai berikut:
 - 1) Kondisi gempa rencana 1000 tahun : 25 mm
 - 2) Kondisi layan : 12 mm
 - 3) *Pile cap* yang tidak berada di permukaan tanah/*sea bed/river bed*, penambahan batas defleksi izin di atas dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas izin defleksi

No.	Klasifikasi Operator Jembatan	Tambahan Defleksi Izin
1.	Jembatan sangat penting (<i>critical bridges</i>)	L/200 atau 0.6% dari panjang tiang
2.	Jembatan penting (<i>essential bridges</i>)	L/100 atau 1% dari panjang tiang
3.	Jembatan lainnya (<i>other bridges</i>)	L/100 atau 1% dari panjang tiang

- 4) Untuk hal-hal khusus, yang defleksi melebihi butir 1) dan 2), maka harus dibuktikan bahwa deformasi yang dihitung masih dapat diakomodasi oleh struktur secara keseluruhan termasuk untuk celah *expansion joint* yang disediakan, khususnya untuk jembatan *multi span*/berbentang banyak;
- b. *Differential settlement* maksimum antar pilar adalah panjang bentang dibagi 1000. Dampak dari *differential settlement* itu harus diperhitungkan untuk struktur jembatan integral dan/atau gelagar menerus atau struktur *continous pile slab*, dimana data tanah dan parameter yang digunakan dalam perhitungan *differential settlement* harus mengikuti SNI terkait;
- c. Batas izin defleksi lateral dinding penahan galian ditentukan oleh (yang tercapai terlebih dahulu):
 - 1) defleksi lateral yang telah mengganggu gedung atau infrastruktur sekitar;
 - 2) batas maksimum yang ditetapkan sesuai standar.

5.1.6.5. Perlakuan Pangkal Tiang Fondasi di Dalam *Pilecap*

Perlakuan pada pangkal tiang pancang (PHT, *Pile Head Treatment*) serta pengankuran tiang fondasi prategang dan non prategang yang diasumsikan terkekang rotasi pada *pile cap* untuk struktur jembatan agar memperhatikan hal berikut:

- a. Pengankuran tiang fondasi pada *pile cap* harus didesain mampu menahan gaya aksial, geser dan momen yang dihasilkan dari pengaruh beban gempa. Sebagai alternatif, pengankuran tiang fondasi dapat didesain berdasarkan kuat nominal aksial, lentur dan geser tiang fondasi;
- b. Pada sistem prategang pratarik, *strand* prategang di pangkal tiang bersifat *inactive* atau *untensioned* (tanpa tegangan), sehingga kapasitas momen dan geser tiang dipenampang pangkal tiang (*free end*) pada dasarnya lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas momen dan geser di bagian penampang tiang yang berada jauh dari pangkal (yaitu di lokasi dimana *strand* prategang sudah dapat mengembangkan tegangannya hingga mencapai tegangan ultimitnya

- (fps)). Hilang atau berkurangnya prategang di pangkal tiang pancang harus dikompensasi dengan penambahan tulangan konvensional/non prategang;
- c. *Strand* prategang yang terbuka saat dilakukan *cutting off* di bagian atas atau pangkal tiang pancang dapat dimanfaatkan sebagai tulangan pengankuran tiang pancang ke dalam *pile cap* selama *strand* tersebut masih utuh dan tidak terpotong. Perlu dicatat bahwa dalam pelaksanaan pembobokan bagian atas tiang (proses *cutting off*) seringkali sulit untuk menjaga agar *strand* yang terbuka tidak putus sehingga hal ini harus menjadi perhatian;
 - d. Bila akan dimanfaatkan, *prestressing strand* yang tidak aktif yang ditanam didalam *pilecap* dapat diasumsikan memiliki kekuatan leleh f_y sama dengan kekuatan leleh baja tulangan konvensional, atau maksimum 500 MPa, selama *strand* tersebut memiliki panjang penanaman yang memadai kedalam *pile cap*;
 - e. Bilamana kapasitas momen, aksial atau geser di ujung tiang belum memadai akibat pembatasan kuat leleh *strand inactive* atau berkurangnya jumlah *strand* akibat ada yang putus saat proses *cutting off*, maka dapat ditambahkan tulangan non prategang (berupa *post-installed* atau *pre-installed rebars* atau *rebars* yang ditanam di dalam rongga *spun pile*) di pangkal tiang fondasi yang akan ditanam di dalam *pile cap*. Baja tulangan konvensional/non prategang tersebut harus terangkur dengan baik pada *pile cap*.
Selain itu, baja tulangan non prategang tersebut juga harus tertanam secara memadai di dalam tiang pancang karena tulangan tersebut juga difungsikan untuk mengkompensasi berkurangnya prategang disepanjang panjang transfer dan panjang penyaluran *strand* di pangkal tiang pancang yang di *cut-off*;
 - f. Pada tiang pancang tipe *spun pile* (berongga), baja tulangan atau rebars tambahan tersebut dapat dimasukkan kedalam rongga yang ada, dengan jumlah dan panjang penanaman sesuai kebutuhan agar penampang di pangkal tiang mampu menahan gaya-gaya dalam yang bekerja. Rongga yang diberi tulangan tambahan tersebut kemudian diisi dengan beton;
 - g. Apabila digunakan pendekatan atau teknologi lain, maka harus dibuktikan dengan prinsip kompatibilitas antara gaya dan deformasi.

5.1.6.6. Level of Fixity Sistem Struktur Keseluruhan

- a. *Level of fixity* harus ditetapkan melalui perhitungan dengan mempertimbangkan karakteristik tanah dan nilai *in-situ* SPT, dimana target *zero rotation* dapat tercapai dengan memperhitungan interaksi antara tanah dan grup tiang, serta memasukkan efek grup dan efek siklis;

- b. Dampak P-Delta dari butir a terhadap stabilitas dan kekuatan sistem tiang fondasi di atas *level of fixity* harus diperhitungkan.

5.1.6.7. Pengujian Struktur Fondasi Jembatan

- a. Pengujian daya dukung aksial dan lateral tiang dilakukan sesuai SNI 8460:2017 (minimum PDA 5% dari jumlah total tiang, aksial statik 1 (satu) tes pada setiap 75 tiang bor atau 100 tiang pancang);
- b. Untuk jembatan dengan bentang 100 m atau lebih harus dilakukan uji statik aksial dan lateral di setiap lokasi *pier*;
- c. Pengujian integritas pada fondasi tiang bor dapat dilakukan dengan *Pile Integrity Test (PIT)*, *Cross Hole Sonic Logging Test (CHSL)*, atau *Thermal Integrity Profiling (TIP)* dengan jumlah 5% dari jumlah total dari masing-masing tipe tiang yang ada dalam rancangan.

5.1.7 Aspek Struktur Bangunan Atas dan Bangunan Bawah

5.1.7.1. Persyaratan *Balanced Stiffness* dan Geometri

- a. Penentuan tipe dan ukuran penampang pilar harus mempertimbangkan pengaruh kekakuan pilar (rasio antara inersia penampang dan tinggi pilar);
- b. Pengecekan persyaratan *balanced stiffness* harus dilakukan pada jembatan *continous/integrated* arah longitudinal atau terdiri atas pilar jamak pada arah transversal.

Nilai persyaratan *balanced stiffness* ditetapkan sesuai yang terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Persyaratan *balanced stiffness*

Perbandingan	Lebar jembatan konstan	Lebar jembatan bervariasi
Antara dua kolom atau portal manapun dalam satu jembatan	$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.5 \text{ (1a)}$	$\frac{k_i^e/m_i}{k_j^e/m_j} \geq 0.5 \text{ (1a)}$
Antara kolom atau portal yang bersebelahan	$\frac{k_i^e}{k_j^e} \geq 0.75 \text{ (2a)}$	$\frac{k_i^e/m_i}{k_j^e/m_j} \geq 0.75 \text{ (2a)}$
k_i^e = kekakuan <i>pier</i> /kolom yang lebih kecil k_j^e = kekakuan <i>pier</i> /kolom yang lebih besar m_i = tributari massa kolom i m_j = tributari massa kolom j		

- c. Pengecekan persyaratan *balanced frame geometry* harus dilakukan pada portal-portal jembatan yang bersebelahan dalam arah longitudinal ataupun transversal.

Nilai persyaratan *balanced frame geometry* ditetapkan sebagai berikut :

$$\frac{T_i}{T_j} \geq 0.7 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

T_i = Periode getar alami portal yang lebih kaku

T_j = Periode getar alami portal yang lebih fleksibel

Catatan :

Bilamana ketentuan *balanced frame geometry* tidak terpenuhi, maka *gap* antara kedua *frame* yang bersebelahan harus dapat mengakomodasi pergerakan lateral beda fasa.

- d. Defleksi lateral kolom (*drift*) atau pilar yang diizinkan pada pilar jembatan dibatasi tidak boleh melebihi 0,5% dari tinggi pilar untuk kombinasi beban layan dan tidak boleh melebihi 1% dari tinggi pilar untuk kombinasi beban ekstrim 1 (gempa);
- e. Untuk jembatan yang menggunakan isolator seismik agar memperhatikan Sub 5.1.7.5 di bawah ini.

5.1.7.2. Analisis Dinamik Struktur

- a. Mode satu dan mode dua harus dominan translasi.
Partisipasi massa perlu diperhitungkan dalam analisis dinamik struktur jembatan untuk meninjau jumlah ragam getar dalam penjumlahan respons ragam harus sedemikian rupa sehingga partisipasi massa ragam efektif dalam menghasilkan respons total harus mencapai sekurang-kurangnya 90%. Beban gempa dari hasil analisis dinamik harus diskalakan tidak kurang dari beban gempa statis;
- b. Apabila butir a tidak dapat dipenuhi karena geometri struktur termasuk diantaranya jembatan lengkung horizontal dan jembatan *skew*, maka harus dilakukan analisis riwayat waktu dengan *PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis)* dan harus diskalakan dengan target spektra desain di tempat tersebut, serta harus dibuktikan dapat menghasilkan kinerja jembatan yang baik;

- c. Frekuensi ragam getar vertikal struktur jembatan dengan tumpuan sederhana harus berada dalam rentang $100/L$ sampai dengan $125/L$;
- d. Analisis *pushover* atau *non linear time history analysis* apabila disyaratkan oleh KKJTJ, maka analisis tersebut harus dilakukan untuk membuktikan bahwa kapasitas jembatan secara keseluruhan masih memenuhi *performance demand* yang disyaratkan oleh kombinasi beban yang ditinjau. Beberapa hal yang perlu diverifikasi antara lain :
 - 1) kapasitas lentur elemen-elemen struktur pendisipasi dapat dicapai;
 - 2) kinerja jembatan pada saat titik *performance* berada diantara IO dan LS untuk analisis *pushover*;
 - 3) untuk analisis *non linear time history performance* dari struktur ditentukan oleh kinerja elemen struktur;
 - 4) lokasi dan urutan terjadinya sendi plastis harus ditampilkan sesuai dengan konsep *strong foundation weak pier* dan *strong girder/slab weak pier*;
 - 5) *base shear demand* \geq *base shear design*;
 - 6) *base shear* saat leleh pertama \geq *base shear design*;
 - 7) kapasitas *fondasi* $>$ *Base shear demand*.
- e. Dalam melakukan analisis *pushover* atau *non linear time history analysis*, kurva *backbone* dari hubungan momen-rotasi elemen-elemen struktur perlu dihitung terlebih dahulu yang dibuat berdasarkan tulangan terpasang;
- f. Dalam melakukan analisis *pushover* atau *non linear time history analysis*, maka harus dibuktikan bahwa tidak terjadi keruntuhan geser;
- g. Persyaratan *detailing* penampang/elemen struktur harus mengikuti ketentuan yang ada dalam *code* terkait, sesuai zona gempa dan target performa jembatan yang disepakati dalam konsep desain;
- h. Jumlah rekaman gempa desain baik untuk *linier time history analysis* maupun *non linier time history analysis* adalah sebagai berikut:
 - 1) 3 (tiga) rekaman gempa dengan nilai maksimum respon struktur yang diambil untuk desain; atau
 - 2) 7 (tujuh) rekaman gempa dengan nilai rata-rata respon struktur untuk desain.

5.1.7.3. Analisis Aerodinamika

- a. Analisis Aerodinamika diperlukan untuk jembatan khusus yang menggunakan penyangga kabel;
- b. Analisis modal pada struktur jembatan harus memenuhi persyaratan rasio frekuensi torsi terhadap lentur vertikal pertama $\geq 2,5$ (Mathivat, 1983), jika rasio

- tersebut tidak terpenuhi atau *ratio* bentang terhadap lebar *deck* ($L/w \geq 30$), maka harus dilakukan tes terowongan angin;
- c. Uji terowongan angin dalam hal ini uji *sectional model* statik dan dinamik wajib dilakukan-untuk bentang utama jembatan 200 m sampai dengan 300 m;
 - d. *Sectional model* (statik dan dinamik) disertai dengan *full model* harus dilakukan untuk keadaan jembatan :
 - 1) Bentang utama ≥ 300 m;
 - 2) Topografi yang mengakibatkan perilaku angin menjadi kompleks;
 - 3) Ketidakteraturan bentuk dari *deck* jembatan;
 - e. Jika diperlukan, dapat dilakukan analisis efektifitas bentuk dan dimensi *wind barrier* terhadap keamanan lalu lintas pengguna jembatan;
 - f. Pemilihan profil *hanger* pada jembatan gantung maupun jembatan pelengkung harus mempertimbangkan aspek aerodinamik, agar tak terjadi *vortex induced vibration* atau *galloping*;
 - g. Kabel pada jembatan *cable-stay* harus dievaluasi aerodinamik agar tidak terjadi *vortex induced vibration* atau *galloping* pada saat hujan dan angin;
 - h. Persyaratan kecepatan angin yang digunakan dalam analisis adalah :
 - 1) Kecepatan angin kritis untuk *flutter* dari hasil uji terowongan angin minimal 1,5x kecepatan angin nominal rencana;
 - 2) Kecepatan angin nominal rencana adalah kecepatan angin di elevasi *deck* jembatan yang didasarkan atas periode ulang 100 tahun dan rata-rata dalam 10 menit;
 - 3) Perencanaan angin pada tahap konstruksi didasarkan atas periode ulang 30 tahun.
 - i. Perlu dilakukan analisis aerodinamik numerik pada tahap konstruksi.

5.1.7.4. Umur Rencana Komponen

- a. Umur rencana minimum perletakan jembatan:
 - 1) Untuk perletakan karet dengan target layan minimum 10 tahun, yang dapat diganti tanpa pengangkatan sepenuhnya dan dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas;
 - 2) Untuk perletakan mekanikal dengan target layan minimum 25 tahun, yang dapat diganti tanpa pengangkatan sepenuhnya dan dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas;
 - 3) Untuk perletakan LRB (*Lead Rubber Bearing*) atau *friction pendulum* dengan target layan minimum 60 tahun, yang dapat diganti tanpa

pengangkatan sepenuhnya dan dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas.

- b. Umur rencana minimum elemen *expansion joint*:
 - 1) Untuk tipe *strip seal* dengan target layan minimum 10 tahun, yang dapat diganti dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas;
 - 2) Untuk tipe *modular* dan *rubber mat* dengan target layan minimum 25 tahun, yang dapat diganti dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas;
 - 3) Untuk tipe *seismic expansion joint (fused system, dll)* dengan target layan minimum 50 tahun, yang dapat diganti dengan gangguan minimal terhadap lalu lintas.

5.1.7.5. Isolator Seismik

- a. Penggunaan isolator seismik
 - 1) Jenis isolator seismik yang dapat digunakan diantaranya: LRB (*Lead Rubber Bearing*) dan *friction pendulum*;
 - 2) Isolator seismik diutamakan untuk struktur *simple girder* dan *continuous girder*;
 - 3) *Non-linear time history analysis* harus dilakukan pada sistem yang menggunakan isolator seismik dan harus dibuktikan seluruh energi gempa didisipasikan melalui isolator seismik dan tidak menimbulkan plastisitas pada elemen struktur yang lain.
- b. Pada jembatan yang diberi isolator seismik, struktur *Bent* dan Kolom/*Pier* (yang dimodelkan tanpa mengaktifkan kontribusi *isolation bearing* dimana *isolation bearing* dimodelkan sebagai koneksi sendi biasa) harus memenuhi *balance criteria* menggunakan rasio *stiffness-to-mass* seperti berikut ini:
 - 1) Rasio terkecil harus tidak kurang dari 25% dari rasio terbesar di antara kolom pada *bent* yang sama;
 - 2) Rasio terkecil harus tidak kurang dari 25% dari rasio terbesar di antara kolom pada *frame* yang sama.
- c. Desain isolator seismik tidak diijinkan apabila desain dengan isolator seismik tidak efektif atau menimbulkan efek kerusakan pada struktur selama masa layan dan ultimit;
- d. Pengujian isolator LRB
 - 1) Dua bentuk pengujian yang dipersyaratkan yaitu uji *prototype* dan uji *factory* mengikuti standar *EN 15129 Anti Seismic Devices 2018*. Bilamana tidak memungkinkan, uji *prototype* diizinkan untuk dilakukan di pabrik produsen LRB selama disetujui oleh KKJTJ dan disaksikan oleh lembaga berwenang;

- 2) Dalam protokol pengujian *cyclic*, beban aksial yang dipakai adalah beban yang terbesar antara beban aksial sesuai dengan kategori jembatan atau beban pada saat *compression stress* 6 MPa;
- 3) Suhu pengujian:
Besarnya suhu pengujian yang dipakai pada saat pengetesan isolator elastomerik mengikuti Tabel 4.

Tabel 4. Suhu pengujian pengetesan isolator elastomerik

Type Pengujian	Ambient	Interior dan Eksterior Isolator Elastomerik
Case I (<i>Standard Temperature During Test</i>)	(23 ± 5) °C	(23 ± 5) °C
Case II (<i>Upper Bound Temperature Dependent Test</i>)	(23 ± 5) °C	40 °C
Case III (<i>Lower Bound Temperature Dependent Test</i>)	(23 ± 5) °C	15 °C

- 4) Berdasarkan data suhu diatas, maka diperlukan sensor temperatur pada isolator elastomerik saat pengetesan berlangsung;
- 5) Pengujian isolator elastomerik yang memakai lebih dari satu *lead core* dilakukan sesuai dengan ketentuan EN15129;
- 6) Pada akhir pengujian isolator elastomerik, 24 jam setelah pengujian, isolator elastomerik tersebut harus mempunyai kemampuan *recentering* (kembali ke bentuk semula).

5.1.7.6. Berbagai Persyaratan Desain Lainnya

- a. Nilai momen inersia efektif untuk perhitungan periode alami struktur (*natural frequency*)
 - 1) Kolom atau Pilar : 0,7 I_g
 - 2) Elemen Beton Prategang : I_g
- b. Rasio antara gaya aksial pada pilar terhadap kapasitas penampang pilar maksimum 0,2 untuk jembatan yang berada pada zona gempa 3 atau 4;
- c. Faktor reduksi lentur untuk elemen beton prategang ditetapkan maksimal 0,9; sedangkan untuk geser ditetapkan maksimal 0,75. Hal ini ditetapkan demikian mengingat pada umumnya kualitas *workmanship* untuk pekerjaan beton masih belum maksimal dan konsisten;
- d. Persyaratan kapasitas kekuatan *socket* pada *hanger* dan *cabl*e lebih kuat dari *hanger* maupun *cabl*e dengan *safety factor*:

- 1) *Socket* jembatan pelengkung dan *suspension* adalah lebih besar atau sama dengan 3,5;
- 2) *Hanger* jembatan pelengkung adalah lebih besar atau sama dengan 2,5;
- 3) *Hanger* jembatan *Suspension* adalah lebih besar atau sama dengan 3,5;
- 4) *Main cable* untuk jembatan *suspension* adalah lebih besar atau sama dengan 3;
- 5) *Cable* untuk jembatan *cable stayed* adalah lebih besar atau sama dengan 2,5.

Safety factor tersebut sudah memperhitungkan tegangan maksimum yang terjadi pada masing-masing komponen termasuk pengaruh konsentrasi tegangan;

- e. Sistem batang *hanger* jembatan harus memperlihatkan perilaku kegagalan pada batang, bukan pada sambungannya;
- f. Lokasi potensi sendi plastis harus memperhatikan:
 - 1) Lokasi dari potensi sendi plastis tidak boleh terjadi di bagian fondasi (di bawah *pile cap*);
 - 2) Untuk *continuous girder*, lokasi potensi sendi plastis yang tidak diperbolehkan pada struktur antara lain adalah *pier head* (dalam arah transversal), *girder* dengan tipe menerus. Untuk memastikan agar hal ini dapat terpenuhi, perlu dilakukan pengecekan terhadap persyaratan, salah satunya, *strong-girder-weak-pier*. Dengan kata lain, kapasitas penampang *pier head* dan *girder* menerus harus lebih besar daripada kapasitas penampang dari pilar pada arah yang relevan. Hal yang sama juga berlaku untuk penampang *pile cap* dan fondasi, agar direncanakan memiliki kapasitas lebih besar dibandingkan kapasitas pilar dengan tulangan terpasang;
 - 3) Untuk *integrated girder* jembatan integral, lokasi sendi plastis dapat juga terjadi di bawah *pier head*.
- g. Tebal pelat lantai kendaraan pada jembatan rangka baja dan pelengkung (*arch bridge*), tebal minimum pelat beton 250 mm (efektif);
- h. Kondisi *Fatigue*
 - 1) Elemen-elemen utama jembatan baja harus memenuhi kriteria desain *fatigue* I dan II berdasarkan AASHTO;
 - 2) Untuk menjamin keamanan baja terhadap kemungkinan *fatigue*, maksimal *stress range* \leq tegangan kritis *fatigue*.

Evaluasi material terhadap *fatigue* perlu memperhatikan *SN-Curve* dari produsen;

- i. Sistem struktur *slab on pile* atau dengan *pile bent* harus dimodelkan secara lengkap, termasuk bagian tiang fondasi di dalam tanah. Interaksi tanah-struktur dapat dimodelkan dengan konstanta *spring* dari kekakuan *secant* pada kurva P-Y yang diperoleh melalui proses iterasi;
- j. Perencanaan *pile cap* harus memperhitungkan ketebalan yang memadai untuk menjamin tercapainya penyebaran beban aksial dengan baik. Apabila diperlukan, hal ini dapat dibuktikan dengan konsep *strut and tie*;
- k. Penyatuan sistem girder pracetak prategang segmental haruslah dengan menerapkan konsep *wet joint*. Sistem *dry joint* dalam hal ini tidak diijinkan;
- l. *Box Girder* tipe prategang eksternal diijinkan digunakan bilamana:
 - 1) Ketebalan diafragma pada segmen angkur/ujung dan segmen deviator haruslah mempertimbangkan upaya penyebaran gaya yang lebih merata (ketebalan diafragma pada segmen angkur dan segmen deviator yang difungsikan sebagai tempat penjangkaran ditetapkan minimal 1,8 m) serta kondisi penulangan yang tidak terlalu rapat. Di luar itu, ketebalan diafragma pada segmen deviator tidak boleh kurang dari 1 (satu) m;
 - 2) Ketebalan *slab* dan *web* pada segmen angkur/ujung dan segmen deviator haruslah memadai untuk penjangkaran tulangan diafragma;
 - 3) Tendon prategang agar diberi proteksi korosi kelas I;
 - 4) *Box girder* harus didesain dengan konsep *no tension* di sepanjang bentangnya;
 - 5) Perhitungan *losses* pada deviator haruslah memperhitungkan pengaruh ketidakpresisian sudut tendon pada segmen deviator;
 - 6) Tendon eksternal harus diberi tumpuan tengah dengan jarak tidak melebihi 7,5 m;
 - 7) Perhitungan deviator dan *anchorage zone* harus dilakukan dengan *nonlinear finite element analysis* dan dimodelkan sebagai *thick shell* atau 3D *solid element*;
 - 8) Apabila tidak digunakan *finite element analysis*, maka distribusi gaya pada *deviator* dapat dihitung dengan metoda *strut and tie* dengan sistem penulangan yang sesuai;
 - 9) Bukaan pada diafragma segmen angkur dan segmen deviator direkomendasikan tidak bersudut tajam untuk mencegah keretakan.
- m. Tebal *pile cap* minimum ditentukan dengan tiga cara yang harus dipenuhi seluruhnya sebagai berikut:
 - 1) Menghitung gaya geser lentur ultimit yang dapat dipikul oleh *pile cap* tanpa memperhitungkan tulangan;

- 2) Gaya geser pons dapat dipikul oleh *pile cap* tanpa tulangan;
 - 3) Mengakomodasi kebutuhan panjang penanaman tulangan *pier* dan tulangan tiang fondasi.
- n. Distribusi gaya-gaya aksial dari pilar ke tiang fondasi melalui *pile cap* harus dilakukan analisis sebagai berikut:
- 1) Distribusi “paku keling”;
 - 2) Distribusi dengan memodelkan tanah dengan pegas, p-y, dan t-z;
 - 3) Apabila geometri pile cap tidak beraturan maka analisis harus dilakukan dengan metode *strut and tie* dengan sistem penulangan yang sesuai dengan pola *strut and tie* yang dikembangkan;
 - 4) Sebagai alternatif terhadap butir 3), dapat digunakan *finite element analysis* dengan *pile cap* dimodelkan sebagai *thick shell* atau *3D solid element*.
- o. Fondasi tiang yang berperilaku seperti mono *bore-pile* tanpa *pile cap* diizinkan bilamana:
- 1) *Displacement lateral* yang terjadi masih bisa lebih besar dari yang diizinkan selama dapat diakomodasi oleh struktur atas;
 - 2) Diameter dan kekuatan segmen yang tertanam dalam tanah atau terendam (*submerged*) dalam air harus lebih besar dari segmen yang tidak tertanam di atasnya;
 - 3) Daerah transisi antara segmen yang tidak tertanam harus dianalisis dengan FEM untuk mengidentifikasi potensi konsentrasi tegangan;
 - 4) Daerah transisi harus diberi detailing seismik sesuai ketentuan yang berlaku.
- p. *Link slab*, bila digunakan untuk menghubungkan bentang-bentang yang bersebelahan, harus didesain dengan *unbonded length* yang panjangnya tidak kurang daripada 5% panjang bentang di sisi bentang yang ditinjau. Material yang direkomendasikan untuk *link slab* adalah material beton berserat karbon bertulang/ material *Engineered Cementitious Composites* (ECC). Jumlah bentang yang dihubungkan *link slab* maksimum 5 bentang dan harus mempertimbangkan pengaruh *shrinkage* (susut) dan suhu;
- q. *Hanger* jembatan baja pelengkung harus menggunakan kabel atau *rod* dan tidak boleh menggunakan baja profil.

5.1.7.7. Tumbukan

Apabila jembatan dibangun melintas jalur pelayaran kapal, baik kapal penumpang, angkutan barang, ataupun tongkang harus dilindungi terhadap tumbukan, dapat dilakukan dengan bentuk-bentuk perlindungan:

- a. Pengaturan lalu lintas agar menjauh dari struktur bawah;
- b. Pembangunan pengaman berupa *dolphin* untuk melindungi pilar ber-*fender*;
- c. Pembangunan struktur proteksi ber-*fender* yang aman terhadap beban/gaya akibat tumbukan kapal.

5.1.8 Penanganan Perubahan Morfologi Sungai dan Pantai

Apabila jembatan melintas pada suatu sungai beberapa persoalan keairan yang mungkin timbul antara lain:

- a. Agradasi, dan degradasi dasar sungai serta potensi perubahan morfologi sungai;
- b. Erosi/*local scouring* di sekitar pangkal dan pilar jembatan yang dapat mengganggu stabilitas fondasi jembatan;
- c. Erosi tebing sungai di sebelah hulu dan hilir lokasi jembatan yang berpotensi mengganggu keamanan jembatan;
- d. Pengurangan tampang basah sungai yang dapat menimbulkan pembendungan;
- e. Kebutuhan ruang bebas atau *free board* yang disyaratkan;
- f. Gangguan terhadap transportasi sungai (apabila ada), dan lain-lain.

Penanganan persoalan keairan tersebut di atas perlu didukung dengan analisis hidraulik satu/dua/tiga dimensi, dengan perangkat lunak yang sudah umum digunakan dan diakui secara nasional maupun internasional. Dari analisis hidraulik tersebut selanjutnya akan diperoleh informasi tentang pola arus di sekitar jembatan yang selanjutnya perlu digunakan sebagai dasar penanganan, dalam kondisi khusus bisa dilakukan uji model fisik hidraulik.

Untuk jembatan yang dibangun di kawasan muara atau dekat pantai, perlu mempertimbangkan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja (misalnya gelombang laut, angin, serta salinitas air dan atau udara) dan perubahan morfologi pantai yang dapat mengganggu stabilitas dan keamanan jembatan.

Penanganan persoalan keairan dapat dilakukan dengan perlindungan dasar dan atau tebing sungai (misalnya pembangunan rip-rap, krib pengarah arus, *hockey stick* pengarah arus, *groin*, *revetment*, *sheetpile*, dll). Tata cara dan panduan rinci seperti yang tertuang dalam SNI-2415 (2016), SNI-1724 (2015), dan FHWA (2012) agar digunakan sebagai referensi, dengan mempertimbangkan kondisi lapangan.

5.2 Survei dan Investigasi

5.2.1 Pemetaan Topografi dan Batimetri

- a. Semua kegiatan pemetaan topografi (dan batimetri) harus terikat baik satu sama lain sehingga informasi posisi (koordinat dan ketinggian global) sudah menggunakan referensi yang sama;
- b. Dilakukan pada daerah rencana jalur jembatan dengan pemetaan mencakup sekurang-kurangnya 5x lebar sungai sebelah hulu dan 3x lebar sungai sebelah hilir, serta sekurang-kurangnya mencakup area sejauh 2x lebar sungai (palung dan bantaran sungai) dari tebing kanan dan kiri sungai;
- c. Skala peta situasi topografi (dan batimetri) 1:50 dengan interval kontur 1 m atau disesuaikan untuk kebutuhan detail perencanaan teknik.

5.2.2 Pemetaan Geologi Teknik

- a. Pemetaan geologi dilakukan untuk mendapatkan informasi diantaranya: geomorfologi, penyebaran tanah dan batuan serta stratigrafinya, struktur geologi (sesar, kekar, dan bidang-bidang diskontinuitas lainnya), aspek hidrogeologi (keberadaan rembesan dan mata air) dan temuan lapangan lainnya (misalkan kelongsoran lama dan jebakan gas dangkal) yang terkait dengan perencanaan teknik;
- b. Dilakukan pada daerah objek perencanaan dan sekitarnya, dengan skala yang disesuaikan kebutuhan perencanaan teknik peta mengacu pada SNI 03-2849-1992 dan SNI 8460:2017;
- c. Dalam pemetaan geologi hendaknya ditampilkan penampang geologi yang mewakili daerah tersebut (struktur geologi).

5.2.3 Penyelidikan Geofisika

- a. Penyelidikan geofisika dilakukan untuk mengetahui profil bawah permukaan seperti perkiraan jenis batuan, muka air, sesar, kekar, dan lain-lain;
- b. Jenis penyelidikan geofisika yang dapat dilakukan pada jembatan disesuaikan untuk kebutuhan detail perencanaan teknik, antara lain:
 - 1) *Gravity*
Untuk memperkirakan sebaran masa batuan secara lateral dan posisi sesar.
 - 2) *Magnetic*
Untuk memperkirakan sebaran masa batuan secara lateral.

- 3) *Resistivity* menggunakan ERT 2D/3D
Untuk memperkirakan pola perlapisan, jenis batuan, muka air, rongga di bawah permukaan, dan perkiraan sesar.
- 4) *Ground Penetrating Radar* (GPR)
Untuk memperkirakan pola perlapisan, muka air tanah, utilitas bawah tanah, rongga di bawah permukaan, dan posisi muka air tanah.
- 5) Perambatan gelombang seismik (seismik refraksi, *downhole seismic test*, *uphole seismic test*, *crosshole seismic test*, *parallel seismic test*, *seismic MASW*)
Untuk memperkirakan sebaran jenis litologi, perkiraan kekuatan masa batuan, dan posisi struktur geologi.

5.2.4 Penyelidikan Geoteknik

5.2.4.1. *Soil Investigation*

Program penyelidikan lapangan meliputi lokasi, kedalaman penyelidikan, jenis peralatan, mengacu pada SNI 8460:2017.

5.2.4.2. Persyaratan Khusus

- a. Pada seluruh tipe jembatan, *soil investigation* (*borelog* dan metode geofisika bila diperlukan) dilakukan pada setiap titik rencana *pilar* dan *abutment*, serta profil tanah digambarkan sesuai dengan kaidah dalam penyajian profil;
- b. Pada struktur *pile slab*, *soil investigation* dilakukan setiap jarak 50 m dan profil tanah digambarkan sesuai dengan kaidah yang berlaku dalam penyajian profil;
- c. Pada jembatan *multi span*/berbentang banyak dengan panjang total di atas 3 km, apabila ada data geoteknik atau geologi lainnya yang mendukung, persyaratan di atas dapat dibuat dengan spasi 50 m sampai dengan 100 m berdasarkan justifikasi *engineering*.

5.2.4.3. Keadaan Khusus

- a. Untuk daerah-daerah yang pernah mengalami longsor, *Undisturbed Sample* (UDS) dilakukan dengan interval 1,5-2 m dan menggunakan CPTU (*Cone Penetrating Test Ultimate*), apabila memungkinkan;
- b. Untuk daerah yang sebelumnya pernah mengalami likuifaksi, maka uji N-SPT dilakukan dengan interval 1 m;
- c. Apabila uji *soil investigation* pada daerah breksi, *conglomerate*, dengan matrik lapuk/matrik lunak, dan *clayshale*, nilai SPT untuk penentuan kuat geser tanah dalam perhitungan daya dukung fondasi perlu dikaji lebih teliti;

- d. Khusus pada daerah berbatuan keras, *soil investigation* perlu dilakukan pengambilan *sample* dengan menggunakan *triple core barrel* untuk mendapatkan hasil *Rock Quality Designation* (RQD) dan *Fracture Index*s selain *Core Recovery* dengan baik;
- e. Khusus untuk daerah berbatu gamping (*limestone*) dan daerah yang diperlukan nilai permeabilitas di bawah permukaan tanah, perlu dilakukan *Lugeon Test* untuk mengestimasi posisi dan volume *cavity*;
- f. Khusus untuk daerah sungai dengan kondisi tebing yang berpotensi longsor, perlu dilakukan analisis longsor beserta alternatif penanganannya;
- g. Apabila dalam proses penyelidikan tanah timbul artesian (air keluar dari lubang bor) hendaknya dipasang pipa *discharge ½ inch* untuk mengetahui berapa tekanan hidrostatik dan volume yang ditimbulkan/dialirkan;
- h. Khusus daerah sungai yang mempunyai tingkat erosi yang tinggi (tanah lumpuran/*silty clay/clayshale*) perlu ditinjau *scouring* akibat banjir dan diberikan alternatif penanganan untuk mempertahankan stabilitas fondasi.

5.2.4.4. Laporan *Soil-Profile* atau *Geological Cross Section*

Laporan *soil-profile* atau *geological cross section* dibuat pada tahap perencanaan dan pelaksanaan yang diantaranya menyatakan:

- a. Penampang dibatasi dengan *end* dan *base lines*, dan satu penampang dibatasi dengan maksimum 4 (empat) pilar untuk bentang kurang dari 60 m;
- b. Penampang dilengkapi dengan legenda dan *layout*;
- c. Skala vertikal dan horizontal dibuat sama serta disajikan secara grafis, terkecuali keadaan khusus;
- d. Penggambaran posisi titik bor, rencana *pilar* berdasarkan elevasi yang ada;
- e. Penampang morfologi permukaan tanah;
- f. Penyebaran lapisan jenis tanah dan atau batuan;
- g. Posisi/letak bor, termasuk dalam fondasi hasil *soil test* dengan *in-situ* SPT *test* dan jenis tanahnya dan parameter teknis tanah dari hasil laboratorium;
- h. Muka air tanah, muka air sungai, kecepatan aliran sungai (dua dimensi) pada saat elevasi muka air sungai rendah, normal, dan tinggi.

5.3 Pelaksanaan Konstruksi Jembatan

Pembangunan konstruksi jembatan khusus mengacu aturan dan standar yang terkait dan masih berlaku. Namun, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan antara lain:

5.3.1 Bahan

- a. Perlu dibuatkan benda uji silinder beton yang dirawat sesuai kondisi lapangan dan sesuai spesifikasi teknis;
- b. Umur beton yang dilaksanakan dilapangan sebelum dilakukan *stressing* minimum 3 (tiga) hari dan memenuhi persyaratan kekuatan.

5.3.2 Peralatan

- a. Alat ukur (manometer pada *jack* prategang) harus terkalibrasi dengan kisaran yang sesuai pelaksanaan di lapangan serta menunjukkan sertifikat yang masih berlaku;
- b. Jika digunakan dua atau lebih motor penggerak, maka harus ada alat sinkronisasi agar pengangkatan/penarikan dapat dilakukan serentak;
- c. Sebelum peralatan pendukung digunakan harus terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan oleh surveyor yg ditunjuk oleh instansi berwenang dan mendapat persetujuan dari instansi berwenang setempat, selanjutnya dilakukan *commissioning*;
- d. Peralatan angkat dan angkut bersertifikat dari instansi berwenang, minimal memiliki SF (*safety factor*) 2 (dua). Khusus untuk peralatan angkat, SF 2 tersebut hanya berlaku selama berat komponen struktur yang diangkat terukur secara lengkap (memperhitungkan berbagai aspek seperti pengaruh beban dinamis, beban angin, dan lain-lain);
- e. *Temporary supporting structure* minimal memiliki SF 2.5 (dua setengah), selama gaya yang dipikul telah memperhitungkan pengaruh-pengaruh yang mungkin terjadi, termasuk pengaruh beban lingkungan dan kekuatan *supporting structure* juga terukur (termasuk pengaruh kelangsingan yang terlemah);
- f. Akses stabilitas *temporary supporting structure* harus memperoleh perhatian utama dan akses pemeriksaan *temporary supporting structure* harus disiapkan.

5.3.3 Persiapan Konstruksi

Pemilik/Pengelola Jembatan harus berkoordinasi dengan Komite Keselamatan Konstruksi (K2K) PUPR untuk menjamin keselamatan pelaksanaan konstruksi.

5.3.4 Pelaksanaan

- a. Eksentrisitas izin lateral girder sebelum diangkat maksimum $L/1000$;
- b. Umur *grouting tendon* minimum 3 (tiga) hari sebelum girder diizinkan untuk diangkat dan telah melalui pengujian dengan hasil sesuai spesifikasi;

- c. Untuk kepentingan pelaksanaan Uji Laik Fungsi Struktur dan Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) agar dipasang sensor *strain gauge* pada baja tulangan beton prategang (misalnya pada *girder*) dan beton non *prategang* (misalnya pada pilar, pelat beton, *link slab*, dan lain-lain) sebelum beton dicor untuk mengetahui regangan yang terjadi dan tidak diperbolehkan melakukan pembobokan;
- d. *Strain gauge* agar dipasang pada lokasi-lokasi tegangan maksimum pada elemen struktur yang akan dimonitor (agar dikoordinasikan dengan perencanaan struktur);
- e. Sambungan segmental pada *girder* prategang tidak diperkenankan menggunakan *dry joint*;
- f. Selama pelaksanaan konstruksi, Pemilik/Pengelola Jembatan harus menyampaikan laporan pelaksanaan konstruksi paling sedikit 6 (enam) bulan sekali dan laporan konstruksi akhir ke KKJTJ melalui Balai Jembatan. Laporan 6 (enam) bulanan tersebut memuat antara lain:
 - 1) kesesuaian antara pelaksanaan konstruksi dengan desain yang disetujui oleh Menteri;
 - 2) kesesuaian antara hasil uji kendali mutu dengan spesifikasi teknis yang tercantum dalam dokumen desain;
 - 3) hasil pelaksanaan fondasi berikut hasil uji tiang;
 - 4) keamanan struktur jembatan dalam hal terjadi perubahan terhadap parameter desain antara lain: parameter material yang terpasang, beban yang bekerja dan lain-lain;
 - 5) penyesuaian atau perubahan metode pelaksanaan;
 - 6) penanganan kejadian khusus;
 - 7) rencana dan kesiapsiagaan tindak darurat;
 - 8) tindak lanjut atas saran yang telah disampaikan oleh Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan pada saat evaluasi desain.
- g. Melakukan pengukuran geometri 3D aktual Jembatan terbangun dengan alat ukur yang dijamin ketelitiannya.

5.4 Uji Laik Fungsi Struktur Jembatan

Uji laik struktur atau uji beban pada jembatan dapat dilihat pada Seksi 7.17 Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). Secara khusus, hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain:

5.4.1 Persiapan

Hal-hal yang harus dipersiapkan sebelum pelaksanaan uji laik fungsi struktur atau uji beban jembatan khusus adalah sebagai berikut:

- a. Penyampaian dokumen selama masa konstruksi/terbangunnya jembatan, termasuk gambar dan dokumen perancangan;
- b. Penyampaian geometri 3D aktual Jembatan terbangun dengan alat ukur yang dijamin ketelitiannya;
- c. Penentuan lokasi uji beban, berdasarkan sistem konstruksi, pelaksanaan konstruksi, kondisi tanah atau pertimbangan lain yang menentukan;
- d. Uji laik fungsi struktur dilakukan untuk meyakinkan bahwa kondisi kinerja jembatan dalam kondisi sehat secara sistem struktur terbangun yang tertuang dalam *as-built drawing*;
- e. Penyampaian presentasi rencana uji beban meliputi:
 - 1) Laporan kondisi jembatan sesuai kondisi aktual di lapangan. Misalnya, ada tidaknya *defect*, pergeseran posisi *bearing*, kekencangan baut, dan sejenisnya;
 - 2) Mengusulkan jumlah dan lokasi bentang yang diuji untuk mendapatkan persetujuan KKJTJ;
 - 3) Mengusulkan rencana tahapan pembebanan, baik uji statik maupun dinamis;
 - 4) Menyiapkan data perencanaan (data *threshold*) antara lain perhitungan lendutan, deformasi, regangan, gaya-gaya kabel (jika ada), frekuensi dan ragam getar struktur, redaman struktur berdasarkan permodelan sesuai dengan rencana pembebanan. Data perencanaan tersebut harus dikoordinasikan dengan Konsultan Perencana;
 - 5) Mengusulkan rencana sistem pengukuran selama uji (sistem dan penempatan alat ukur);
 - 6) Mengusulkan rencana penggunaan, penempatan dan jumlah peralatan utama dan pendukung saat uji statik dan dinamis yang memadai dan terkalibrasi (lengkap dengan spesifikasinya) untuk pengukuran respon dan aksi eksternal;
 - 7) Menyiapkan sumber daya terkait serta alat yang diperlukan pada saat uji beban dilakukan;
 - 8) Menyiapkan form isian untuk mencatat hasil pengukuran (membandingkan dengan rencana dan batasannya) guna mempermudah pencatatan dan pengontrolan saat uji beban;
- f. Membuat jadwal detail pelaksanaan uji beban (setiap tahap);
- g. Pelaksana pengujian beban harus mengetahui atau menguasai kondisi terkait dan hasil keluaran pengamatan dari peralatan, serta mengerti perilaku jembatan yang diuji;

- h. Dalam pengujian harus dipersiapkan peralatan keselamatan kerja standar maupun untuk di ketinggian seperti *safety belt* dan *full body harness*, karena ada pekerjaan yang harus memasang peralatan sensor di ketinggian serta pemeriksaan visual. Pemeriksaan visual yang dilakukan, bukan dimaksudkan untuk penilaian kondisi;
- i. Lokasi pengujian beban yang dapat mengganggu lalu lintas, harus sudah berkoordinasi dengan Balai Besar/Balai Pelaksanaan Jalan Nasional/Dinas PU/Dinas Perhubungan/Kepolisian.

5.4.2 Uji Beban Jembatan

Uji beban jembatan dapat dilakukan, jika tidak ditemukan *defect* yang mempengaruhi kekuatan struktur, tidak adanya pergeseran posisi *bearing*, baut tidak kendur, dan sejenisnya. Hal-hal yang perlu diperhatikan pada pelaksanaan uji beban antara lain:

- a. Semua sensor dan alat ukur yang digunakan dalam uji beban harus terkalibrasi dengan sertifikat kalibrasi yang masih berlaku;
- b. Semua sensor dan alat ukur yang digunakan dalam uji beban harus sesuai dengan peruntukannya;
- c. Dilakukan pengamatan pergerakan pada *expansion joint*;
- d. Dilakukan pengamatan rotasi dan deformasi vertikal di *pile cap* dan diperbandingkan dengan perhitungan hasil perencanaan fondasi jembatan;
- e. Pembacaan regangan yang terjadi pada baja tulangan beton prategang (misalnya pada *girder*) dan beton non *prategang* (misalnya pada pilar, pelat beton, *link slab*, dan lain-lain) agar menggunakan sensor *strain gauge* yang sudah dipasang sebelum beton dicor dan tidak diperbolehkan melakukan pembobokan;
- f. *Strain gauge* agar dipasang pada lokasi-lokasi tegangan maksimum pada elemen struktur yang akan dimonitor (agar dikoordinasikan dengan perencana struktur).

5.4.2.1. Uji Beban Statik

- a. Sensor *strain gauge* tipe *foil* mempunyai tahanan minimal 350 ohm dan *temperature compensated*, dengan *connecting wire* tahanan 0,1 ohm/m dan panjang maksimum 20 m, dan tidak ditempelkan pada beton;
- b. Untuk sinkronisasi alat ukur diperlukan *pre-loading* sebesar maksimal 10% dari beban uji rencana;
- c. Pembebanan yang akan dilakukan pada saat uji statik adalah beban hidup layan minimal sebesar 70 % dari beban hidup yang direncanakan tanpa Beban Garis Terpusat (BGT);
- d. Skema penempatan beban harus berdasarkan garis pengaruh;

- e. Pembebanan dengan menggunakan truk, truk harus ditimbang terlebih dahulu agar sesuai rencana pembebanan, baik waktu truk kosong maupun terisi;
- f. Pelaksanaan pembebanan harus dilakukan secara bertahap mulai dari beban 0%, untuk mengetahui *zero setting* dan bertambah secara bertahap minimum 3-4 tahap sampai tercapai beban maksimum sesuai tahapan dalam butir e. *Zero setting* hanya dilakukan 1 (satu) kali di awal pengujian;
- g. Setiap tambahan pembebanan harus diamati dan dikontrol dengan teliti, bila ada penyimpangan pada besaran-besaran yang diukur agar uji beban segera dihentikan dan dilakukan evaluasi;
- h. Tahapan pembebanan harus dilakukan untuk mendapatkan minimal pembacaan lendutan, regangan, rotasi, dan lain-lain;
- i. Titik pengamatan lendutan minimal di lokasi L/4, L/2, dan 3L/4, bila perlu ditambah pengukuran perpindahan (vertikal, transversal, dan longitudinal) di tumpuan;
- j. Setiap titik pengamatan lendutan harus diamati minimal dengan dua alat ukur terkalibrasi yang berbeda tipe dengan ketelitian yang memadai untuk dilakukan pengontrolan pengukuran;
- k. Proses pelepasan beban (*unloading*) dilakukan secara bertahap dengan tahapan sebagaimana pada proses pembebanan;
- l. Untuk struktur *slab on pile*, tidak dilakukan uji pembebanan statik. Kecuali, terjadi kondisi khusus.

5.4.2.2. Uji Beban Dinamis

- a. Uji pembebanan dinamis dilakukan untuk mengetahui redaman, frekuensi alami, ragam getar struktur, dan faktor pembesaran dinamis (*dynamic amplification factor*) dibandingkan dengan data perencanaan;
- b. Uji DAF (*Dynamic Amplification Factor*) dilakukan dengan memasang tonjolan melintang selebar jembatan di tengah bentang dengan menggunakan balok kayu setebal 5 cm dan lebar 10 cm, dan dibuat agar tidak bergeser saat dilewati;
- c. Uji pembebanan dinamis minimum dilakukan dengan 2 (dua) metode, yaitu impuls atau *exciter/shaker* dan *ambient* diantaranya beban bergerak. Impuls dan *ambient* dilakukan masing-masing minimal 3 (tiga) kali dengan data yang *acceptable*;
- d. Pemasangan *accelerometer* (jumlah dan posisi) dan pemberian beban dinamis dibuat sedemikian rupa agar diperoleh data respon getaran yang dapat memberikan nilai frekuensi, ragam getar, dan redaman;

- e. Uji pembebanan dinamis (impuls) dilakukan sebelum dan setelah uji pembebanan statik;
- f. Pada sistem jembatan bentang *continuous* dengan isolator seismik perlu dilakukan pemantauan parameter dinamis sebagai bahan evaluasi.

5.4.2.3. Kriteria Penerimaan

- a. Dengan beban hidup 70%:
 - 1) Apabila tanpa trotoar, lendutan maksimum di tengah bentang yang terjadi tidak boleh melampaui $70\% \times L/800$; atau
 - 2) Apabila dengan trotoar, lendutan maksimum di tengah bentang yang terjadi tidak boleh melampaui $70\% \times L/1000$.
Untuk gelagar menerus atau integral, L = bentang diantara *inflection points* dari garis elastik;
- b. Nilai lendutan hasil pembebanan statik haruslah lebih kecil atau sama dengan perhitungan teoritis;
- c. Nilai residual pada besaran mekanik yang diukur saat *unloading* tidak boleh lebih besar dari 5%. Bila nilai residual lebih dari 5% dari nilai maksimum yang terukur, maka perlu dilakukan analisis lebih lanjut;
- d. Nilai frekuensi alami dari hasil pembebanan dinamis sebelum dan setelah uji statik haruslah sama atau lebih tinggi dari perhitungan teoritis;
- e. Perbedaan antara frekuensi sebelum dan setelah uji pembebanan statis maksimal 5%;
- f. Pasca uji pembebanan tidak ditemukan *defect* baru. *Defect* yang dimaksud adalah retak, *spalling* dan lain-lain;
- g. Bilamana terjadi perbedaan respon yang signifikan antara hasil uji dan hasil perhitungan, maka perlu dilakukan *adjustment* pada model numerik dengan mempertimbangkan berbagai sumber kekakuan tambahan (seperti *barrier*, *link slab*, dsb) dan *boundary condition*;
- h. Bilamana salah satu dari kriteria butir b, d, atau e di atas tidak terpenuhi, dapat dipertimbangkan toleransi 5% dengan persetujuan KKJTJ;
- i. Apabila butir h tidak dapat dipenuhi, maka harus dilakukan *retrofitting* sampai memenuhi ketentuan butir h.

5.5 Pemantauan dan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) Jembatan

Terkait jembatan khusus maka terdapat beberapa kewajiban melakukan pemantauan oleh Pemilik/ Pengelola Jembatan, pemantauan jembatan tersebut dilaksanakan:

- a. Selama pelaksanaan konstruksi jembatan; atau
- b. Tahap operasi dan preservasi jembatan

Pemantauan jembatan dilakukan dengan tujuan:

- a. untuk mengetahui secara dini kemungkinan adanya penyimpangan perilaku jembatan atau adanya permasalahan yang sedang berkembang; dan
- b. agar penyimpangan perilaku atau permasalahan yang sedang berkembang pada jembatan dapat ditangani secara cepat dan tepat sebelum berkembang menjadi ancaman yang nyata bagi keamanan jembatan.

Pemantauan jembatan dilakukan dengan cara:

- a. Pengamatan dan pengukuran geometri jembatan dan lingkungan sekitar jembatan, antara lain dilakukan pada bentang tengah *deck* jembatan, kepala pilar jembatan, kepala pylon, kabel dan abutmen jembatan. Pengamatan dan pengukuran geometri jembatan ditujukan untuk mengetahui indikasi perilaku jembatan;
- b. Pemeriksaan kondisi jembatan dan lingkungan jembatan paling jauh berjarak radius 100 m dari jembatan;
- c. Uji laik fungsi jembatan, meliputi uji laik fungsi jembatan terhadap seluruh elemen jembatan termasuk keutuhan sistem struktur. Uji laik fungsi jembatan dilakukan untuk membandingkan kesesuaian konstruksi jembatan terhadap dokumen perencanaan serta apabila diperlukan dapat dilakukan pemeriksaan khusus dan uji laik fungsi ditujukan untuk mengetahui kemantapan struktur sebelum jembatan dipergunakan untuk umum pasca konstruksi atau pasca rehabilitasi.

Terkait Pelaporan hasil operasi, preservasi dan pemantauan jembatan harus disusun oleh Pemilik/Pengelola Jembatan dalam Laporan Operasi, Preservasi, dan Pemantauan Jembatan, yaitu:

- a. Laporan pemantauan meliputi:
 - 1) laporan rutin pemantauan mencakup hasil pengamatan dan pengukuran geometri jembatan;
 - 2) laporan tahunan pemantauan berupa rangkuman laporan geometrik, laporan kondisi, laporan hasil uji laik fungsi dan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (Sistem MKS) selama satu tahun serta evaluasinya;
 - 3) laporan pemeriksaan inventarisasi;
 - 4) laporan pemeriksaan detail;
 - 5) laporan pemeriksaan khusus; dan
 - 6) laporan tindak tanggap darurat bila diperlukan.
- b. Laporan operasi dan laporan preservasi pada akhir tahun dirangkum masing-masing menjadi laporan tahunan operasi dan laporan tahunan preservasi;

- c. Laporan tahunan operasi dan laporan tahunan preservasi bersama laporan tahunan pemantauan disusun dalam satu laporan tahunan operasi, preservasi, dan pemantauan;
- d. Laporan tahunan operasi, preservasi dan pemantauan disampaikan kepada Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan untuk dikaji.

Terkait Sistem MKS Jembatan yang merupakan bagian dari kegiatan pemantauan jembatan telah tertuang dalam Spesifikasi Khusus Interim SKh-1.7.42 yang telah dikeluarkan oleh Direktur Jenderal Bina Marga tahun 2020. Sistem MKS juga sering disebut dengan SHMS (*Structural Health Monitoring System*). Dalam pedoman ini, terdapat penambahan penjelasan atau hal-hal yang harus diperhatikan.

5.5.1 Fungsi Sistem Monitoring Kesehatan Struktur

Sistem MKS Jembatan ini berfungsi sebagai pelengkap dari Sistem pemantauan yang diterapkan pada jembatan bentang panjang sesuai ketentuan BMS (*Bridge Management System*) tahun 1992 dan Pedoman Pemeriksaan Jembatan tahun 2011.

5.5.2 Tujuan Sistem Monitoring Kesehatan Struktur

Tujuan Sistem MKS adalah:

- a. Verifikasi antara desain dengan keadaan aktual di lapangan;
- b. Memonitor respon struktur sesuai dengan tipe jembatan dan beban yang bekerja (sesuai poin 5.5.4);
- c. Mengevaluasi tingkat kinerja/*performance level* berdasarkan nilai *threshold* yang telah ditetapkan dari uji beban maupun dari analisis berdasarkan *as built drawing and specification*;
- d. Untuk keperluan *traffic management (warning system)*.

5.5.3 Keterlibatan Konsultan

Konsultan perencana dan konsultan uji beban harus dilibatkan dalam perencanaan Sistem MKS termasuk dalam penentuan titik-titik kritis respon struktur, parameter struktur yang akan diukur dan jenis sensor, serta nilai *threshold*-nya. Nilai *threshold* harus mempertimbangkan batasan kinerja berdasarkan *code* yang berlaku, hasil perhitungan dengan menggunakan model struktur yang *holistic* dan sesuai dengan kondisi terpasang, serta hasil pengukuran saat uji beban.

5.5.4 Aspek yang Dimonitor Sistem MKS

Sistem MKS dirancang untuk memonitor:

- a. Aksi eksternal (beban *traffic*, beban gempa, beban angin, beban suhu, beban lingkungan dan sejenisnya); dan
- b. Respons struktur jembatan (*displacement*, defleksi, rotasi, kemiringan *pier/pylon*, regangan, gaya kabel/hanger, getaran, reaksi tumpuan, *differential settlement*, dan *defect*). Untuk jembatan yang memiliki potensi *scouring* agar dipasang *scouring sensor*.

5.5.5 Sensor yang Digunakan untuk Monitoring

5.5.5.1. Aksi Eksternal

- a. Beban *Traffic* : WIM (*Weight in Motion*),
- b. Beban Angin : Anemometer,
- c. Beban Gempa : *Sensor Seismic / Strong Ground Motion*,
- d. Beban Suhu : *ATRH (Ambient Temperature and Relative Humidity)*,
Termokopel/*Strain Gauge* untuk suhu Material

5.5.5.2. Respons

- a. *Displacement* : *Displacement Transducer*, LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), DMM (*Displacement Multi Meter*), *Dial gauge*, *Laser Distance*, *Linear Potentiometer*, dan sejenisnya;
- b. Rotasi dan Kemiringan : *Tiltmeter*;
Pier/Pylon
- c. Regangan : *Foil Strain Gauge*, *Vibrating Wire Strain Gauge*, *strain transducer* (yang digunakan harus *self temperature compensated*);
- d. Gaya Kabel/*Hanger* : EM (*Elasto Magnetic*), *Load Cell*, Akselerometer yang terkalibrasi pada jembatan tersebut;
- e. Getaran : Akselerometer, *Velocitymeter*, *Laser Vibrometer*, *Dynamic Strain Gauge*, *Dynamic Displacement Transducer*;
- f. Reaksi Tumpuan : *Load Cell*, *Strain Gauge Transducer*;
- g. *Structural Differential Settlement* : DMM (*Displacement Multi Meter*);
- h. *Defect* : *Strain Gauge* dengan *Fiber Optic*, *Crackmeter*, *Corrosion Sensor*;
- i. *Scouring* : *Scouring Sensor*;

- j. Pergerakan tanah : *Inclinometer, Piezometer, Sub-surface Extensometer;*

5.5.5.3. Visual Monitoring

- a. Visual monitoring dilakukan untuk *traffic management, vandalisme, security, terrorism*, dan rekonstruksi *unforeseen condition atau force majeure*;
- b. Visual monitoring dilakukan menggunakan sejumlah CCTV yang *high resolution* dan diintegrasikan dengan *warning system*;
- c. Disediakan *monitoring room* khusus yang memenuhi persyaratan untuk Sistem MKS.

5.5.6 Dynamic Properties Jembatan

Pengukuran *natural frequency* struktur jembatan menggunakan metode antara lain:

- a. OMA (*Operational Modal Analysis*);
- b. FFT (*Fast Fourier Transform*)*

*Khusus untuk pengukuran frekuensi vertikal pertama pada jembatan *simple span*

5.5.7 Ambang Batas (Threshold)

Penetapan *threshold* dan kriteria kesehatan struktur jembatan mengacu pada DED (*Detailed Engineering Design*), *as-built drawing* (kondisi terbangun) yang dilengkapi dengan foto pendukung dan hasil uji beban statik dan dinamik. Nilai *threshold* juga harus mempertimbangkan batasan kinerja berdasarkan *code* yang berlaku dan hasil perhitungan dengan menggunakan model struktur yang menyeluruh (*holistic*).

5.5.8 Usia Layan Sistem MKS

- a. Usia layan Sistem MKS harus dijamin berfungsi minimum 10 tahun. Setiap 10 tahun Sistem MKS harus dievaluasi dan didesain ulang (apabila diperlukan), sampai usia layan jembatan;
- b. Dalam usia layan tersebut termasuk di dalamnya *maintenance* sensor, kalibrasi berkala, jaminan sistem bekerja, penggunaan *software* termasuk analisa, dan otomatisasi berkala;
- c. Perencana Sistem MKS harus menentukan spesifikasi dan membuat manual *maintenance* Sistem MKS (jadwal penggantian, *maintenance*, dan kalibrasi).

5.5.9 Hasil Monitoring dan Laporan Sistem MKS

- a. Perencana Sistem MKS harus membuat format pelaporan bulanan, tahunan untuk dilaporkan kepada Direktur Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR;
- b. Perencana Sistem MKS harus merancang hasil *monitoring* yang ditampilkan *realtime* pada *monitoring center* secara informatif dan terhubung ke *server* Kementerian PUPR;
- c. Data mentah disimpan di *cloud* Kementerian PUPR untuk dianalisis lebih lanjut oleh sistem manajemen terintegrasi MKS.

5.5.10 Ketentuan Lainnya

- a. Perencana Sistem MKS perlu mengajukan usulan organisasi manajemen Sistem MKS bersama dengan Kementerian PUPR dan instansi terkait;
- b. Perencana Sistem MKS harus merencanakan optimasi jenis, jumlah dan penempatan sensor pada rencana Sistem MKS;
- c. Pembacaan regangan yang terjadi pada baja tulangan beton prategang (misalnya pada *girder*) dan beton non *prategang* (misalnya pada pilar, pelat beton, *link slab*, dan lain-lain) agar menggunakan sensor *strain gauge* yang sudah dipasang sebelum beton dicor (dimana digunakan juga saat uji laik fungsi jembatan) dan tidak diperbolehkan melakukan pembobokan;
- d. *Strain gauge* agar dipasang pada lokasi-lokasi tegangan maksimum pada elemen struktur yang akan dimonitor (agar dikoordinasikan dengan perencanaan struktur);
- e. Optimasi akuisisi data, perekaman data, dan analisis data;
- f. Sumber energi untuk Sistem MKS harus berkelanjutan (*sustainable*) dan stabil;
- g. Sistem komunikasi data untuk Sistem MKS harus berkelanjutan dan stabil;
- h. Ruang kontrol atau *monitoring center* harus representatif serta dikontrol suhu dan *humidity*-nya untuk menjaga keberlangsungan alat-alat elektronik yang digunakan dalam Sistem MKS;
- i. Penangkal petir terdiri dari dua jenis proteksi.
 - 1) Proteksi struktur jembatan,
 - 2) Proteksi *supply* listrik untuk peralatan monitoring.
- j. Penangkal petir yang digunakan dalam Sistem MKS harus handal dalam mengantisipasi sambaran petir pada struktur jembatan. Penangkal petir secara periodik harus dievaluasi sesuai dengan perkembangan terkini yang diatur di dalam *code* (SNI Penangkal Petir);
- k. Selama masa operasi dan preservasi, apabila jembatan belum memiliki sistem MKS maka Pemilik/ Pengelola Jembatan tetap membuat laporan hasil monitoring/ pemantauan yang mengacu pada poin 5.5.

Bibliografi

- AASHTO *Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition 2014 Interim*
- AASHTO *Guides Specification for Seismic Isolation Design, 4th Edition, 2014*
- AASHTO/AWS D 1.5 M/D 1.5 *Bridge Welding Code, 2015*
- AASHTO M251-2016 *Standard Specification for Plain and Laminated Elastomeric Bridge Bearings*
- AASHTO LRFD *Bridge Construction Specification, 2017*
- AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications, 9th Edition, 2020*
- AISC *American Institute of Steel Construction Manuals 15th Edition, 2017*
- British Standard CD363 Design Rules for Aerodynamics Effects on Bridge, 2020*
- CalTrans *Seismic Design Criteria, 2013*
- DIN 18800 *Out of Plane Buckling and in-Plane Buckling for Arch Bridge, 2008*
- EN 15129 *Anti Seismic Devices, 2018*
- FHWA 2012 *Hydraulic Design of Safe Bridges*
- JIS H 0401:2007 *Test Methods for Dip Galvanized Coatings*

SALINAN

Daftar Penyusun dan Unit Kerja Pemrakarsa

No.	Nama	Unit Kerja	
1.	Pemrakarsa	Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jenderal Bina Marga, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Balai Jembatan.	
2	Koordinator	Panji Krisna Wardana, ST, MT	Kepala Balai Jembatan
3.	Penyusun/ Pembahas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahmi Aldiamar, ST., MT; 2. Neni Kusnianti, ST, MT 3. Ande Akhmad Sanusi, SH., M.Sc. 4. Prof (R) Dr. Ir. Anwar Yamin, MT 5. Ir. Indra Miduk Hutabarat, MM 6. Ir. Nono, M.Eng.Sc. 7. Drs. Gugun Gunawan, M.Si. 8. Vebry Widya Puspitasari, ST. 9. Hanifah Mardiana, ST, M.Eng.Sc. 10. Dinan Mutiara, ST., MT. 11. Mohammad Febriant, ST., MT. 12. Muhammad Fuady R., ST. 13. Kharisma Putri Aurum, S.T., M.T. 14. Wangga Nugrahtama, S.T., M.T. 15. Yudi Hardiana, ST., MT. 16. Dr. Diyanti, ST., MT. 	Narasumber Direktorat Jenderal Bina Marga
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Prof. Ir. Bambang Suhendro, M.Sc., Ph.D. 2. Prof. Ir. Bambang Budiono, ME., Ph.D. 3. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. 4. Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.Sc., Ph.D. 5. Prof. Ir. Iswandi Imran, MASc., Ph.D. 6. Prof. Ir. Jamasri. Ph.D. 7. Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas, M.Eng. 8. Prof. Ir. Djoko Legono, Ph.D. 9. Prof. Dr. Eng. Imam Achmad Sadisun, ST., MT. 10. Prof. Dr. Ir. Hidajat Sugihardjo, M., MS. 11. Prof. Widjojo Adi Prakoso, Ph.D. 12. Dradjat Hoedajanto, ST.Si., M.Eng., Ph.D. 13. Dr. Fariduzzaman, MSc., MT. 14. Dr. Ir. Paulus K., MBA. 15. Dr. Ir. Heru Purnomo, DEA. 16. Ir. Djoni Rustino, MT. 	Narasumber KKJTJ
		Prof. Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, MT.	Narasumber Akademisi
		Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc.	Narasumber Praktisi