



STUDI KOMPARASI PEDOMAN DESAIN SEBAGAI REFERENSI INOVASI DAN DESAIN BENDUNGAN BETON GRAVITY

STUDY COMPARISON OF DESIGN GUIDELINES AS A REFERENCE FOR DESIGN INNOVATION OF CONCRETE GRAVITY DAMS

Jumadil Syam

PT Poso Energy

Jalan Raya Narogong, Cileungsi, Bogor, Indonesia

Correspondent E-Mail: jumadilisyam.malea@gmail.com

Diterima: 07 April 2022; Direvisi: 02 Juni 2022; Disetujui: 13 Juni 2022

ABSTRACT

Concrete gravity dams continued to develop in Indonesia even though the population is still smaller than embankment dams. Until 2021 there consist of 16 concrete gravity dams or about 7% of all dams in Indonesia. The utilization of concrete gravity dams in Indonesia is 75% for hydropower or as many as 12 dams. Concrete gravity dam is a high-risk structure so the design of concrete gravity dams must be referred to the guidelines where applicable in Indonesia and internationally with approval from Dam Safety Organization. In Indonesia, the construction of concrete gravity dams cannot be separated from the participation of design consultants from developed countries such as the UK, Japan, US, Canada, Korea, and China. Indonesian Water Resource Guidelines 2009 is formal reference that must be adhered to by all design and construction planners in Indonesia, so that designs that refer to the guidelines and manuals from foreign countries must go through a comparison and evaluation process to meet the design acceptance criteria in accordance with the Indonesian Water Resource Guidelines 2009. Comparison processes include load conditions, design concepts, seismic analysis methods, stability and stress analysis methods, and stability and stress acceptance criteria. As a results of comparison, we can get information that the Indonesian Water Resource Guidelines 2009 apply stability and stress acceptance criteria more conservative. As consequence, the investment cost for the construction of concrete gravity dams in Indonesia is becoming more expensive.

Keywords: dams, concrete gravity, guidelines, comparation, stability.

ABSTRAK

Bendungan beton gravity terus mengalami pengembangan di Indonesia meskipun populasinya masih lebih kecil dibandingkan bendungan urugan. Hingga tahun 2021 terdapat 16 bendungan beton gravity atau sekitar 7% dari seluruh bendungan di Indonesia. Pemanfaatan bendungan beton gravity di Indonesia 75% untuk PLTA atau sebanyak 12 bendungan. Tingkat risiko keselamatan yang tinggi mewajibkan desain bendungan beton gravity harus mengacu kepada pedoman analisis yang berlaku di Indonesia serta Internasional dengan persetujuan Organisasi Keamanan Bendungan. Pembangunan bendungan beton gravity di Indonesia tidak terlepas dari peran serta konsultan perencana dari negara maju seperti UK, Japan, US, Canada, Korea, dan China. Pedoman SDA 2009 merupakan acuan formal yang harus ditaati oleh seluruh perencana konstruksi di Indonesia sehingga desain yang mengacu pada pedoman dan manual dari luar Indonesia harus melalui proses komparasi dan evaluasi agar memenuhi kriteria penerimaan desain sesuai dengan Pedoman SDA 2009. Komparasi dilakukan meliputi kondisi pembebanan, konsep desain, metode analisis kegempaan, metode analisis stabilitas dan tegangan serta kriteria penerimaan stabilitas dan tegangan. Hasil komparasi menunjukkan bahwa pada beberapa tinjauan kondisi Pedoman SDA 2009 menerapkan kriteria penerimaan stabilitas dan tegangan yang lebih ketat sehingga memiliki aspek keamanan lebih baik. Namun demikian sebagai konsekuensi adalah biaya investasi pembangunan bendungan beton gravity di Indonesia juga lebih besar.

Kata Kunci: bendungan beton gravity, pedoman, komparasi, kriteria stabilitas.

PENDAHULUAN

Bendungan beton *gravity* merupakan struktur bendungan beton masif yang stabilitas dan kekuatannya didesain berdasarkan bentuk geometri, massa, dan kekuatan beton yang digunakan. Berdasarkan metode konstruksinya, bendungan beton *gravity* dibagi menjadi dua tipe yaitu *conventional concrete gravity dam* dan *Roller Compacted Concrete (RCC) gravity dam* (Kementerian PU, 2009). Bendungan beton *gravity* merupakan bangunan yang memiliki nilai ekonomi yang tinggi dilihat dari biaya investasi maupun pemanfaatannya. Namun demikian di balik manfaat yang besar juga memiliki tingkat risiko keselamatan yang tinggi apabila desain dan konstruksinya tidak sesuai dengan kaidah-kaidah dalam pedoman. Desain bendungan beton *gravity* di Indonesia mengacu kepada pedoman yang ditetapkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum melalui Direktur Jenderal Sumber Daya Air No.38/KPTS/D/2009 "Analisis Dinamik Bendungan Beton Gaya Berat" yang selanjutnya disebut dengan Pedoman SDA 2009. Salah satu pertimbangan dari dikeluarkannya pedoman tersebut adalah sebagai upaya pengamanan bendungan yang dibangun pada daerah rawan gempa, mengingat bahwa Indonesia berada di wilayah yang mempunyai intensitas dan skala kegempaan yang tinggi (Kementerian PU, 2009). Pedoman SDA 2009 disusun berdasarkan pengalaman-pengalaman ahli bendungan Indonesia dan saran dari para pakar bendungan serta merferensi kepada manual bendungan beton *gravity* dari negara maju yang secara Internasional dapat diterima, diantaranya adalah desain manual dari US yang dikeluarkan oleh U.S. Bureau of Reclamation dan U.S. Army Corps of Engineers (Kementerian PU, 2009). Berbagai pedoman dan manual desain dari negara-negara maju lainnya memiliki konsep tersendiri baik dari aspek pembebanan, antisipasi potensi bahaya banjir dan kegempaan, metode analisis, maupun kriteria penerimaan stabilitas dan kekuatan desain, yang semuanya itu dapat dijadikan sebagai referensi dalam inovasi dan pengembangan desain bendungan beton *gravity* di Indonesia.

Eksistensi Bendungan Beton di Indonesia

Berdasarkan data yang diperoleh dari Pedoman SDA 2009, dan "Buku 25 Tahun Organisasi Keamanan Bendungan Indonesia" tahun 2018 serta data tambahan lainnya, dapat diketahui bahwa terdapat 16 bendungan beton *gravity* di Indonesia, terdiri atas 15 tipe bendungan *conventional concrete gravity* dan 1 tipe RCC. Bendungan beton *gravity* tertinggi di Indonesia hingga saat ini adalah Bendungan Balambano

dengan tinggi 99 m dan merupakan satu-satunya bendungan beton *gravity* yang dikonstruksi dengan metode RCC di Indonesia (Kementerian PU, 2009). Dari 16 bendungan beton *gravity*, 7 diantaranya dimiliki oleh BUMN, 4 dimiliki oleh pihak swasta dan 5 lainnya adalah milik pemerintah. Berdasarkan aspek pemanfaatannya, 12 diantaranya digunakan sebagai penyedia tampungan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) baik yang dikelola langsung oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) maupun oleh pihak swasta. Selebihnya digunakan untuk keperluan irigasi.

Terkait perencana desain bendungan beton *gravity* di Indonesia sebagaimana pada **Tabel 1** bahwa dari 16 bendungan beton *gravity*, 13 diantaranya direncanakan dengan melibatkan perencana konstruksi dari luar negeri, 1 diantaranya oleh perusahaan perencana dari Indonesia (ID) dan 2 lainnya tidak diketahui perencananya (N/A). Adapun perencana konstruksi dari luar negeri yang dimaksud adalah dari United Kingdom (UK), Japan (JP), United States (US), Canada (CA), Korea (KR) dan China (CN).

Tantangan Bendungan Beton di Indonesia

Berdasarkan hasil *review economic comparison* bendungan beton *gravity* dengan bendungan urugan (*embankment dam*) dalam International Commission on Large Dams (ICOLD) 2000 B.117 bahwa dengan perbandingan volume material sekitar 1:6, biaya pembangunan bendungan beton *gravity* cenderung lebih mahal (ICOLD, 2000). Bendungan beton *gravity* memiliki karakter struktur yang sangat berat, *solid* dan kaku sehingga menuntut kondisi geologi dan geologi teknik yang baik dan kuat untuk mampu menghasilkan tahanan geser fondasi serta menerima *bearing pressure* dari tubuh bendungan tanpa mengalami masalah-masalah *instability*.

Bendungan beton *gravity* sifatnya sensitif terhadap pergerakan sehingga idealnya tidak dibangun pada jalur sesar aktif. Pergerakan fondasi dapat menyebabkan *crack* pada *joint block*, bidang kontak bendungan-fondasi serta pada tubuh bendungan sehingga dapat menurunkan efisiensi *drain*, mereduksi tahanan geser dan kekuatan struktur serta memicu terjadinya kegagalan bendungan. Tantangan lain dihadapi ke depannya adalah masalah kegempaan, yaitu semakin meningkatnya aktivitas, intensitas dan skala kegempaan di Indonesia dari tahun ke tahun sehingga menuntut inovasi desain struktur bendungan beton *gravity* yang tahan gempa dan tetap ekonomis.

Tabel 1 Bendungan Beton *Gravity* di Indonesia

No.	Nama Bendungan	Tinggi (m)	Pemilik Bendungan	Perencana Konstruksi
1	Klampis	22,3	Dinas Pekejaan Umum	Mac Donald & Partners (UK)
2	Sigura-gura	46	PT Inalum	Nippon Koei Co. Ltd (JP)
3	Garung	36,2	PT PLN (Persero)	Nippon Koei Co. Ltd (JP)
4	Lingkuk Lamun	15	Kementerian PU	N/A
5	Siruar	39	PT Inalum	Nippon Koei Co. Ltd (JP)
6	Muer	15,3	Kementerian PU	N/A
7	Pejengkolan	27	Kementerian PU	PRC.ECI (US)
8	Bakaru	16,5	PT PLN (Persero)	New Jec Inc. (JP)
9	Roi Roka	19	Kementerian PU	Tata Guna Patria (ID)
10	Kotapanjang	58	PT PLN (Persero)	TEPSCO, Yodya Karya (JP, ID)
11	Balambano	99	PT Vale Indonesia	Pacific Rim Power (CA)
12	Musi	16	PT PLN (Persero)	Nippon Koei Co. Ltd (JP)
13	Sipansihaporas	38	PT PLN (Persero)	TEPSCO, TGP, Cs. (JP, ID)
14	Karebbe	74	PT Vale Indonesia	SNC Lavalin (CA)
15	Wampu	61	PT Wampu Electric Power	Daewoo Engineering (KR)
16	Poso-1	23,5	PT Poso Energy	POWERCHINA Chengdu (CN)

Sumber: Organisasi Keamanan Bendungan, 2018.

Masa Depan Bendungan Beton di Indonesia

Dengan berbagai tantangan yang dihadapi untuk membangun bendungan beton *gravity* khususnya di Indonesia, tidak berarti menutup peluang untuk pembangunan bendungan beton *gravity* yang lebih masif di masa depan. Seiring dengan perkembangan dan inovasi teknologi di bidang sumber daya air dan bendungan, semakin bertambahnya pengalaman-pengalaman ahli bendungan di Indonesia dan berbagai negara, serta dilakukannya inovasi, penyesuaian-penyesuaian serta pengembangan terhadap pedoman dan manual desain bendungan beton *gravity* maka tantangan-tantangan tersebut ke depannya dapat dikonversi menjadi peluang dalam pengembangan bendungan beton *gravity* di Indonesia. Berdasarkan hasil analisis dalam ICOLD 2000 B.117 bahwa kemajuan industri suatu negara menjadi salah satu parameter dalam pemilihan tipe bendungan. Rasio jumlah bendungan *gravity* terhadap total jumlah bendungan di negara-negara non-industri adalah sekitar 4% dan di negara-negara industri adalah sekitar 22% (ICOLD, 2000). Sementara untuk di Indonesia hingga saat ini rasionya adalah sekitar 7%. Banyaknya potensi sumber daya air yang belum teroptimalkan, sementara tidak semua lokasi memiliki ketersediaan material untuk membangun bendungan tipe urugan menjadi dasar pertimbangan bendungan beton *gravity* perlu terus dikembangkan di Indonesia. Beberapa kelebihan dari bendungan beton *gravity* diantaranya adalah terkait ketersediaan meterialnya karena membutuhkan volume material konstruksi yang lebih kecil, jika dibandingkan dengan bendungan

tipe urugan (Soedibyo, 2003). Apabila kondisi klimatologi setempat sering turun hujan maka bendungan beton *gravity* lebih disukai. Bendungan tipe urugan dengan lapisan kedap air di tengah yang umumnya menggunakan tanah liat akan mengalami kesulitan di dalam pematatannya (Soedibyo, 2003). Dari aspek pemanfaatannya, stabilitas struktur bendungan beton *gravity* tidak terpengaruh oleh kondisi surut cepat (*rapid drawdown*) pada muka air tampungan sehingga cocok untuk membangun tampungan PLTA konvensional tipe *peak load* dan PLTA tipe *pump storage* dengan sistem tandon harian (Soedibyo, 2003). Mengingat bahwa peningkatan kebutuhan energi listrik ramah lingkungan di masa depan semakin pesat, maka peluang pengembangan bendungan beton *gravity* di Indonesia juga menjadi semakin besar.

Tujuan Penelitian

Studi komparasi pedoman desain bendungan beton *gravity* dilakukan untuk membandingkan antara pedoman desain yang berlaku di Indonesia dengan pedoman desain yang ada di negara lain terkait dengan berbagai aspek tinjauan dalam desain bendungan beton *gravity*. Melalui studi ini juga diharapkan agar dapat membuka wawasan kepada seluruh pihak yang terlibat dalam pengembangan dan pembangunan bendungan beton *gravity* bahwa masing-masing pedoman desain dari berbagai negara memiliki persamaan dan perbedaan terkait kriteria desain, metode analisis, faktor keamanan dan batasan penerimaan dalam desain bendungan beton *gravity*.

METODOLOGI

Studi komparasi pedoman analisis desain bendungan beton *gravity* dimulai dengan mengumpulkan berbagai pedoman dan manual bendungan beton *gravity* dari beberapa negara maju dan selanjutnya melakukan inventarisasi dan analisis perbandingan mengenai konsep desain, kondisi pembebanan, metode analisis seismik, metode analisis stabilitas dan tegangan serta kriteria penerimaan stabilitas dan tegangan pada bendungan. Pertimbangan terhadap pedoman dan manual yang dikomparasikan dengan Pedoman SDA 2009 adalah sebagai berikut:

- 1) Merupakan referensi utama dan memiliki kemiripan dengan Pedoman SDA 2009,
- 2) Berasal dari negara asal perusahaan konstruksi yang pernah menjadi perencana desain bendungan beton *gravity* di Indonesia,
- 3) Berasal dari negara yang berpengalaman dalam desain dan konstruksi bendungan beton *gravity* di berbagai negara, dan
- 4) Berasal dari negara yang memiliki kemiripan tantangan alam dengan Indonesia khususnya masalah kegempaan.

Studi komparasi pedoman analisis bendungan beton *gravity* memiliki tantangan tersendiri karena masing-masing memiliki konsep, kriteria, dan definisi terhadap tinjauan beban yang berbeda-beda. Beberapa pendekatan dan penyesuaian dilakukan agar pedoman dan manual tersebut dapat disandingkan dengan Pedoman SDA 2009 dalam tinjauan kondisi pembebanan yang sama. Salah satu penyesuaiannya adalah dengan memodifikasi istilah kondisi pembebanan dalam Pedoman SDA 2009 serta menambah satu kondisi pembebanan baru yang belum tercantum dalam Pedoman SDA 2009 yaitu kondisi *post-earthquake*. Kondisi pembebanan bendungan beton *gravity* berdasarkan Pedoman SDA 2009 adalah sebagai berikut:

- 1) Kondisi 1 (pembebanan luar biasa, selesai konstruksi),
- 2) Kondisi 2 (pembebanan biasa, elevasi air normal),
- 3) Kondisi 3 (pembebanan luar biasa, elevasi banjir standar proyek),
- 4) Kondisi 4 (pembebanan ekstrim, konstruksi dengan gempa OBE),
- 5) Kondisi 5 (pembebanan luar biasa, elevasi air normal dengan gempa OBE),
- 6) Kondisi 6 (pembebanan ekstrim, elevasi air normal dengan gempa SEE), dan
- 7) Kondisi 7 (pembebanan ekstrim, elevasi air maksimum PMF).

Adapun kondisi pembebanan bendungan beton *gravity* yang telah disesuaikan dan akan digunakan

dalam analisis perbandingan adalah sebagai berikut:

- 1) *Usual Condition* (sama dengan Kondisi 2),
- 2) *Unusual Condition* (mencakup Kondisi 1 dan Kondisi 3),
- 3) *Dynamic Unusual Condition with Seismic OBE* (sama dengan Kondisi 5),
- 4) *Static Extreme Condition with Maximum Flood* (sama dengan Kondisi 7),
- 5) *Dynamic Extreme Condition with Seismic OBE* (sama dengan Kondisi 4),
- 6) *Dynamic Extreme Condition with Seismic SEE* (sama dengan Kondisi 6), dan
- 7) *Post-earthquake Condition*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komparasi Konsep Desain Bendungan Beton

Konsep desain bendungan beton *gravity* di Indonesia sebagaimana yang tertuang dalam Pedoman SDA 2009 termasuk dalam kategori konsep desain deterministik. Konsep desain deterministik tidak mempertimbangkan adanya ketidakpastian pada beban dan kapasitas tahanan serta kekuatan material (Cordier et al., 2017). Faktor keamanan diambil sebagai suatu nilai tertentu berdasarkan fakta-fakta empiris, pengalaman dan *engineering judgement* (CDA, 2013). Dalam konsep desain deterministik dilakukan pendekatan untuk mengakomodir ketidakpastian dengan menggunakan nilai konservatif (*extreme*) pada pembebanan, mengambil nilai konservatif (paling aman) untuk kekuatan material dan mengaplikasikan nilai faktor keamanan yang konservatif (CDA, 2013). Adapun pedoman dan manual desain bendungan beton *gravity* yang mengadopsi konsep desain deterministik diantaranya Pedoman SDA 2009 (Indonesia), USBR 1976 (United States), USACE 1995 (United States), USACE 2005 (United States), FERC 2016 (United States), JSCE 2007 (Japan), SL 319-2005 (China), ANCOLD 1998 (Australia), CDA 2013 (Canada) dan NZSOLD 2015 (New Zealand).

Konsep lain yang biasa ditemui dalam pedoman analisis bendungan *gravity* lainnya adalah konsep analisis semi-probabilistik atau *partial coefficient*. Konsep semi-probabilistik selain menerapkan nilai faktor keamanan sebagai kriteria penerimaan di akhir analisis, juga mempertimbangkan adanya ketidakpastian terhadap beban serta parameter tahanan dan kekuatan material. Untuk beban-beban tertentu biasanya menggunakan *partial coefficient* dengan nilai > 1 . Begitu juga dengan tahanan material fondasi seperti tahanan friksi ($f = \tan \phi$) dan kohesi (c) turut direduksi sehingga nilai parameter desain yang digunakan menjadi lebih kecil. Tingkat ketidakpastian antara kedua parameter tahanan fondasi tersebut berbeda di

mana parameter kohesi memiliki ketidakpastian yang lebih besar, sehingga nilai *partial coefficient* untuk parameter kohesi (c) ditentukan lebih besar daripada parameter friksi ($f = \tan \phi$) (Cordier et al., 2017). Beberapa pedoman dan manual desain bendungan beton *gravity* yang mengadopsi konsep semi-probabilistik atau *partial coefficient* diantaranya adalah IS 6512-2019 (India), DL 5108-1999 (China), CFBR 2012 (France) dan NVE 2005 (Norway).

Komparasi Pembebanan Bendungan Beton

Tinjauan kondisi pembebanan yang diterapkan dalam Pedoman SDA 2009 adalah merujuk pada kondisi pembebanan dalam manual USACE 1995 "*Gravity Dam Design EM 1110-2-2200*". Adapun yang terbaru yaitu USACE 2005 "*Stability Analysis for Concrete Structure EM 1110-2-2100*" juga masih mengadopsi penjabaran kondisi pembebanan yang sama. Ketujuh kondisi pembebanan dalam Pedoman SDA 2009 dan USACE 1995 merupakan penjabaran dari tiga kondisi pembebanan utama yaitu kondisi biasa (*usual*), kondisi luar biasa (*unusual*) dan kondisi ekstrim (*extreme*). Istilah ini meneruskan istilah yang digunakan dalam USBR 1976 "*Design of Gravity Dams*". Perlu diketahui bahwa USBR 1976 tidak mempertimbangkan kondisi beban yang melibatkan gempa OBE dan menggunakan PMF sebagai banjir desain dan dikategorikan sebagai kondisi *unusual*, sedangkan USACE 1995 mengkategorikan PMF sebagai kondisi *extreme*. Berdasarkan Pedoman SDA 2009 dan USACE 1995 bahwa banjir desain tidak berarti langsung diambil sama dengan PMF.

Engineering guideline lainnya dari United States yang membahas tentang analisis bendungan beton *gravity* adalah yang dikeluarkan oleh Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2016 Chapter III "*Gravity Dams*". FERC 2016 mengeliminasi kondisi pembebanan yang melibatkan gempa OBE, serta menambahkan satu kondisi pembebanan yaitu kondisi *post-earthquake*. Analisis terhadap kondisi pembebanan yang melibatkan gempa SEE tetap dilakukan namun tidak lagi ditetapkan nilai batasan sebagai kriteria penerimaan terhadap stabilitas struktur pada kondisi tersebut (FERC, 2016). Kriteria penerimaan stabilitas bendungan beton *gravity* selanjutnya ditentukan oleh analisis kondisi *post-earthquake* dengan mempertimbangkan kerusakan-kerusakan yang mungkin terjadi saat gempa SEE menimpa bendungan (FERC, 2016). *Guideline* ini memungkinkan desain struktur bendungan beton *gravity* menjadi lebih ekonomis apalagi jika besaran akselerasi gempa di lokasi rencana bendungan cukup besar. Penggunaan kriteria penerimaan Pedoman SDA 2009 atau USACE 1995 untuk lokasi bendungan dengan akselerasi gempa OBE dan SEE

yang besar, maka dibutuhkan modifikasi pada dasar bendungan serta pada kemiringan tubuh bendungan (hulu dan hilir) untuk memenuhi kriteria keamanan desain. Kondisi pembebanan *post-earthquake* juga telah digunakan dalam CDA 2013 "*Dam Safety Guidelines*" dan NZSOLD 2015 "*New Zealand Dam Safety Guidelines*".

Adapun pedoman dan manual yang dikomparasikan kondisi pembebanannya dengan Pedoman SDA 2009 adalah sebagai berikut:

- 1) USBR 1976 "*Design of Gravity Dams*",
- 2) FERC 2016 "*Gravity Dams*",
- 3) JSCE 2007 "*Standard Specifications for Concrete Structures 2007 - Dam Concrete*",
- 4) SL 319-2005 "*Design Standard for Concrete Gravity Dams*",
- 5) CDA 2013 "*Dam Safety Guidelines 2007*", dan
- 6) NZSOLD 2015 "*New Zealand Dam Safety Guidelines*".

USACE 1995, USACE 2005 dan Pedoman SDA 2009 memiliki kondisi pembebanan yang identik, meskipun beberapa informasi lebih detail dan jelas terkait aplikasi beban-beban dasar telah ditambahkan dalam Pedoman SDA 2009. Namun demikian, untuk arah aplikasi beban gempa pada USACE 1995 dan USACE 2005 merekomendasikan kombinasi arah beban gempa horisontal arah hulu dan hilir dan vertikal atas dan bawah, sehingga diperoleh 4 kombinasi arah beban gempa, yaitu:

- 1) Arah horisontal hulu dan vertikal atas,
- 2) Arah horisontal hulu dan vertikal bawah,
- 3) Arah horisontal hilir dan vertikal atas, dan
- 4) Arah horisontal hilir dan vertikal bawah.

Rangkuman kondisi pembebanan berdasarkan pedoman dan manual yang digunakan dalam desain analisis stabilitas dan kekuatan bendungan beton *gravity* di Indonesia dan beberapa negara dapat dilihat pada **Tabel 2**. Berdasarkan beban dasar yang digunakan dalam kombinasi beban **Tabel 2** masih terdapat beban-beban tambahan lainnya yang dapat dipertimbangkan untuk disertakan apabila berdasarkan *engineering judgement* bahwa beban tersebut akan bekerja dan signifikan pengaruhnya terhadap stabilitas dan kekuatan struktur bendungan. Beban-beban tersebut diantaranya adalah tekanan angin (*wind pressure*), tekanan gelombang (*wave pressure*), tekanan tanah (*earth pressure*), tekanan hisap (*subatmospheric pressure*), dan beban temperatur (*temperature load*). Adapun kondisi tidak terduga lainnya misalnya terjadi kegagalan fungsi *drain* atau *overtopping* juga dapat menjadi pertimbangan apabila kondisi tersebut belum terwakili dalam tujuh kondisi pembebanan yang ditinjau.

Tabel 2 Komparasi Kondisi Pembebanan Desain Bendungan Beton *Gravity*

Pedoman SDA 2009	USBR 1976	FERC 2016	JSCE 2007	SL 319-2005	CDA 2013	NZSOLD 2015
Indonesia	United States	United States	Japan	China	Canada	New Zealand
Usual Condition						
$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$
Static Unusual Condition						
D	N/A	$D + H_f + U + S$	D	$D + H_f + U + S$	$D + H_{IDF} + U + S$	N/A
$D + H_f + U + S$			$D + H_f + U + S$			
Dynamic Unusual Condition with Seismic OBE						
$D + H_n + U + S + OBE + H_d$	N/A	N/A	$D + H_n + U + S + OBE + H_d$	$D + H_n + U + S + OBE + H_d$	N/A	$D + H_n + U + S + OBE + H_d$
Static Extreme Condition with Maximum Flood						
$D + H_{PMF} + U + S$	$D + H_{PMF} + U + S$	N/A	$D + H_{PMF} + U + S$	$D + H_{PMF} + U + S$	$D + H_{PMF} + U + S$	$D + H_{IDF} + U + S$
Dynamic Extreme Condition with Seismic OBE						
$D + OBE$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Dynamic Extreme Condition with Seismic SEE						
$D + H_n + U + S + SEE + H_d$	$D + H_n + U + S + SEE + H_d$	$D + H_n + U + S + SEE + H_d$	N/A	N/A	$D + H_n + U + S + SEE + H_d$	$D + H_n + U + S + SEE + H_d$
Post-earthquake Condition						
N/A	N/A	$D + H_n + U + S$	N/A	N/A	$D + H_n + U + S$	$D + H_n + U + S$

Sumber: Rangkuman Penulis.

Keterangan:

- D : Beban mati atau berat sendiri tubuh bendungan termasuk struktur pelengkannya.
- H_n : Tekanan hidrostatis kondisi *Normal Water Level* (NWL) dan hubungannya dengan tinggi air di hilir bendungan.
- H_f : Tekanan hidrostatis kondisi *Design Flood Level* (DFL) dan hubungannya dengan tinggi air di hilir bendungan, maksimum *Inflow Design Flood* (IDF) untuk CDA 2013.
- H_{PMF} : Tekanan hidrostatis kondisi *Probable Maximum Flood* (PMF) dan hubungannya dengan tinggi air di hilir bendungan.
- U : Tekanan *uplift* terkait dengan tinggi air di hulu dan hilir bendungan, efektifitas drainase and reduksi efektifitas drainase kondisi *post-earthquake* (jika dipertimbangkan).
- S : Tekanan sedimen di hulu bendungan jika dipertimbangkan.
- OBE : Gempa *Operating Basic Earthquake*, periode ulang yang digunakan tergantung pada masing-masing pedoman.
- SEE : Gempa *Safety Evaluation Earthquake*, dapat menggunakan gempa MDE atau MCE, tergantung pada masing-masing pedoman.
- H_d : Tekanan hidrodinamik pada tampungan bendungan akibat guncangan gempa.
- N/A : Data tersebut tidak tersedia.

Komparasi Metode Analisis Seismik, Stabilitas, dan Tegangan

Berdasarkan referensi dari berbagai pedoman dan manual desain bendungan beton *gravity* di beberapa negara dapat dilihat bahwa pada prinsipnya metode analisis yang digunakan adalah serupa dengan yang direkomendasikan dalam Pedoman SDA 2009. Namun demikian untuk pedoman revisi terbaru misalnya FERC 2016 tidak merekomendasikan penggunaan metode *pseudo-static* dalam metode analisis seismik. Begitu juga untuk aplikasi *hydrodynamic pressure*, FERC 2016 merekomendasikan metode *reservoir added mass* diperhitungkan dengan pendekatan *modal vibration*, menggantikan pendekatan *rigid body motion*. Metode analisis yang cukup detail lainnya direkomendasikan oleh NZSOLD 2015 yaitu analisis respon seismik bendungan dengan mempertimbangkan perilaku *non-linear* struktur. Referensi lainnya terkait analisis *non-linear* bendungan beton *gravity* dapat dilihat pada USBR 2006 "State-of-Practice for the Nonlinear Analysis of Concrete Dam".

Untuk parameter-parameter analisis seismik bendungan beton *gravity* di Indonesia selain mengacu kepada Pedoman SDA 2009 juga merferensi ke ICOLD 2016 B.148, "Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017", SNI 8460:2017 serta "Pedoman Studi Kegempaan untuk Penentuan Parameter Desain Gempa Bendungan". Penjelasan yang lebih detail mengenai metode dan langkah-langkah analisis respon seismik bendungan beton *gravity* dapat juga dilihat dalam ANCOLD 1998, EM 1110-2-6050, EM 1110-2-6051, dan EM 1110-2-6053. Rangkuman metode analisis seismik berdasarkan Pedoman SDA 2009 dan beberapa pedoman dan manual dari beberapa negara dapat dilihat dalam **Tabel 3**.

Untuk metode analisis stabilitas dan tegangan struktur bendungan secara umum digunakan metode *rigid body limit equilibrium* dengan mengasumsikan bendungan beton *gravity* sebagai struktur *cantilever* 2 dimensi (2D). Apabila bendungan beton akan dibangun pada tebing sungai dengan bukit tumpuan (*abutment*) yang curam maka dapat dilakukan analisis 3 dimensi (3D) dengan metode *finite element* untuk memperoleh informasi terkait perilaku tegangan struktur bendungan (Kementerian PU, 2009). Analisis *finite element* biasanya digunakan untuk bendungan beton *gravity* yang strukturnya cukup kompleks, memiliki tingkat resiko yang sangat tinggi atau berada pada area dengan intensitas dan skala kegempaan yang tinggi sehingga dibutuhkan lebih banyak informasi terkait perilaku respon seismik bendungan secara menyeluruh. Metode *finite element* mampu memberikan informasi yang

lebih detail mengenai kondisi tegangan pada bidang transisi penampang hilir bendungan, konsentrasi tegangan pada *joint* struktur bendungan dengan pilar pintu, atau tegangan-tegangan di sekeliling *opening drainage gallery* atau *grouting chamber* sehingga dapat dipertimbangkan untuk melakukan modifikasi geometri atau penambahan *reinforcement* pada area-area lokal yang mengalami tegangan tarik melebihi batas kekuatan tarik izin beton.

Dalam Pedoman SDA 2009, analisis stabilitas dan tegangan bendungan beton *gravity* kondisi *post-earthquake* belum dijelaskan secara khusus metodenya sehingga sebagai pertimbangan jika akan melakukan analisis *post-earthquake* dapat merferensi ke CDA 2013, FERC 2016 dan NZSOLD 2015 yang merekomendasikan dilakukannya analisis *post-earthquake*. Secara umum metode analisis *post-earthquake* sama dengan metode analisis pada kondisi beban statik, namun yang perlu diperhatikan adalah adanya perubahan-perubahan pada parameter kekuatan geser fondasi dan struktur yang mengalami degradasi akibat *crack* dan atau pergeseran selama kejadian gempa. Aspek lain yang perlu ditinjau dalam analisis *post-earthquake* adalah potensi terjadinya penurunan efektifitas fungsi drainase fondasi sehingga mengakibatkan tekanan *uplift* pada dasar fondasi meningkat drastis. Potensi peningkatan tekanan lateral akibat terjadinya likuifaksi pada endapan sedimen di hulu bendungan juga dapat menjadi pertimbangan dalam analisis. Analisis *post-earthquake* diperlukan untuk memastikan bahwa setelah kejadian gempa SEE, bendungan tidak mengalami kegagalan meskipun nilai faktor keamanan diperoleh lebih kecil dari kondisi sebelum terjadi gempa. Sebagai catatan bahwa kondisi *post-earthquake* sifatnya sementara sehingga segera setelah kejadian gempa, harus dilakukan perbaikan pada fondasi dan tubuh bendungan sehingga nilai-nilai faktor keamanan kondisi normal dapat kembali terpenuhi.

Komparasi Kriteria Penerimaan Stabilitas dan Tegangan

Bendungan beton *gravity* dinyatakan layak untuk konstruksi serta operasi apabila hasil evaluasi desain memenuhi kriteria penerimaan stabilitas dan tegangan. Kriteria stabilitas bendungan beton *gravity* yang dievaluasi adalah:

- 1) Keamanan terhadap potensi *overturning* yang dievaluasi berdasarkan letak resultan pada dasar fondasi,
- 2) Keamanan terhadap potensi *shear sliding*, utamanya pada bidang *interface* bendungan-fondasi serta bidang lemah di bawah fondasi jika ada, dan
- 3) Keamanan terhadap *bearing pressure* fondasi.

Tabel 3 Komparasi Metode Analisis Seismik, Stabilitas, dan Tegangan Bendungan Beton Gravity

Pedoman SDA 2009	FERC 2016	JSCE 2007	SL 319-2005	CDA 2013	NZSOLD 2015
Indonesia	United States	Japan	China	Canada	New Zealand
Seismic Analysis Method					
1) <i>Pseudo-static</i> 2) <i>Dynamic methods of stress analysis</i> a) <i>Simplified response spectrum</i> b) <i>Finite element response spectrum</i> c) <i>Finite element acceleration-time history</i>	1) <i>Pseudo-dynamic method</i> 2) <i>Modal dynamic method</i> a) <i>Response spectrum</i> b) <i>Time history</i> 3) <i>Direct solution method</i> 4) <i>Reservoir added mass</i>	1) <i>Pseudo-static</i> 2) <i>Dynamic response analysis</i> ^[1]	1) <i>Pseudo-static</i> 2) <i>Dynamic methods</i> a) <i>Response spectrum</i> b) <i>Time history</i>	1) <i>Pseudo-static</i> 2) <i>Dynamic methods</i> a) <i>Response spectrum</i> b) <i>Time history</i>	1) <i>Pseudo-static</i> 2) <i>Linear elastic dynamic analysis</i> 3) <i>Non-linear dynamic analysis</i>
Stability and Stress Analysis Method					
1) <i>Limit equilibrium</i> 2) <i>Cantilever beam 2D analysis</i> 3) <i>Trial-load twist 3D analysis</i> 4) <i>Finite element method</i> ^[2]	1) <i>Gravity 2D rigid block</i> 2) <i>Finite element method</i> 3) <i>Block rocking analysis</i> ^[3] 4) <i>Cracked base analysis</i> ^[4]	2D <i>cantilever method</i>	1) <i>Gravity method</i> 2) <i>Rigid body limit equilibrium</i> 3) <i>Finite element method</i> ^[5,6] 4) <i>Physical model test</i> ^[7]	1) <i>Rigid body limit equilibrium</i> ^[8] 2) <i>2D slice on plane support surface</i> ^[8] 3) <i>3D finite element</i> ^[8]	1) <i>Rigid body limit equilibrium</i> 2) <i>Cracked base analysis</i> 3) <i>Finite element method</i>

Sumber: Rangkuman Penulis.

Keterangan *Superscript*:

- 1 : Sebagai analisis lanjutan apabila besaran gempa desain pada lokasi bendungan cukup besar.
- 2 : Sebagai analisis lanjutan pada tahap *final design* jika dibutuhkan investigasi tegangan yang lebih detail dan akurat.
- 3 : Apabila dalam analisis dinamik mengindikasikan terjadi retak pada tubuh bendungan, maka analisis *block rocking* perlu dilakukan.
- 4 : Bidang kontak dam-fondasi diasumsikan mengalami retak apabila terjadi tegangan tarik pada bidang tersebut.
- 5 : Sebaiknya dilakukan pada bendungan tinggi atau menengah dengan kondisi fondasi yang kompleks.
- 6 : Sebaiknya dilakukan untuk menganalisis tegangan pada struktur sebagai pertimbangan kebutuhan *reinforcement*.
- 7 : Dapat dilakukan sebagai verifikasi desain apabila dibutuhkan.
- 8 : Metode ini disebutkan dalam CDA 1999, yang merupakan edisi terdahulu dari CDA 2013.

Kriteria keamanan terhadap rembesan dan fenomena *piping* pada batuan fondasi tidak dibahas secara spesifik dalam pedoman desain bendungan beton *gravity*. Rekahan pada batuan fondasi baik yang terjadi secara alami maupun akibat aktivitas *blasting* direkomendasikan untuk diperbaiki dengan *consolidation grouting*. Untuk mencegah rembesan atau bocoran air dari hulu ke hilir bendungan disyaratkan untuk melakukan *curtain grouting* minimal 2/3 tinggi bendungan dengan kriteria permeabilitas antara 3 - 5 Lugeon.

Kriteria penerimaan stabilitas dalam pedoman SDA 2009 adalah identik dengan USACE 1995 dan USACE 2005. Namun perlu diketahui adanya perbedaan yang signifikan pada kriteria penerimaan letak resultan untuk kondisi beban *unusual* dimana Pedoman SDA 2009 menetapkan harus dalam area 1/3 dasar fondasi sementara USACE 1995 dan USACE 2005 mengizinkan letak resultan hingga area 1/2 dasar fondasi. Dalam hal ini Pedoman SDA 2009 lebih ketat dalam batasan letak resultan. Namun dalam Pedoman SDA 2009 dijelaskan bahwa penyimpangan terhadap kriteria penerimaan stabilitas masih dapat diterima dengan ketentuan harus ada izin dari pemberi tugas atau tim yang ditunjuk dan ditetapkan dengan studi fondasi yang komprehensif (Kementerian PU, 2009). Sebuah pendapat yang menarik dalam USBR 1976 bahwa *overturning stability* tidak disediakan kriteria penerimaannya, meskipun tetap dapat dievaluasi dengan perbandingan rasio momen *resisting* terhadap momen *overturning* (USBR, 1976). Bendungan dianggap aman terhadap *overturning* selama *bearing pressure* di hilir bendungan tidak melampaui tegangan yang diizinkan (USBR, 1976). Adapun beban gempa tidak dipertimbangkan sebagai faktor penyebab *overturning* karena sifat alaminya berupa getaran bolak balik (*oscillatory nature*) (USBR, 1976). Beberapa pedoman dan manual desain selain melakukan evaluasi pergeseran dengan metode *shear sliding* juga melakukan evaluasi dengan metode *sliding friction* yaitu mengabaikan kontribusi kohesi dalam tahanan geser. Pertimbangannya adalah adanya ketidakpastian yang besar terhadap besaran kohesi yang mungkin terbangun pada bidang *interface* bendungan-fondasi. Dalam FERC 2016 diakui bahwa kohesi tetap ada, namun sangat sulit untuk melakukan pengukuran melalui sampel bor dan pengujian karena seringkali gagal memulihkan kondisi ikatan bidang *interface* sampel untuk pengujian. Adapun sampel yang berhasil dipertahankan utuh menunjukkan sebaran nilai hasil pengujian yang ekstrim (FERC, 2016). Kriteria penerimaan evaluasi *sliding friction* ini dimuat dalam FERC 2016, CDA 2007, ANCOLD 1998, SL 319-2005, dan NZSOLD 2015.

Kriteria penerimaan tegangan ditentukan berdasarkan kuat tekan beton yang digunakan dengan mengambil porsi tertentu yang diizinkan sebagai batasan tidak boleh terlampaui untuk masing-masing kondisi pembebanan yang ditinjau. Baik tegangan tekan maupun tegangan tarik harus dievaluasi pada sisi bendungan secara menyeluruh. Kriteria penerimaan tegangan tekan dan tarik beton dalam Pedoman SDA 2009 secara praktis sama dengan USACE 1995. Namun perlu diperhatikan bahwa unit tegangan yang digunakan dalam Pedoman SDA 2009 adalah *kilopascal* (kPa) sementara dalam USACE 1995 adalah *pounds per square inch* (psi). Kelalaian dalam kalibrasi unit tegangan dapat berdampak "*overestimate*" terhadap tegangan tekan dan tarik yang diizinkan.

Khusus untuk analisis dinamik (*linear finite element analysis*), kekuatan tarik yang digunakan dalam mengevaluasi hasil analisis adalah kuat tarik yang diperoleh dari uji modulus kehancuran (*modulus rupture*) (Kementerian PU, 2009). Hasil uji tarik belah (*splitting test*) dapat juga digunakan dengan meningkatkan nilainya menjadi 1,33 agar sebanding dengan *modulus rupture*. Kuat tarik beton harus ditingkatkan 50% apabila digunakan dengan beban gempa kondisi pembebanan cepat (Kementerian PU, 2009). Adapun kriteria penerimaan stabilitas dan tegangan pada analisis bendungan beton *gravity* dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disampaikan kesimpulan dan saran sebagai berikut:

- 1) Bendungan beton *gravity* di Indonesia memegang peranan penting dalam penyediaan energi listrik melalui PLTA sehingga perlu dilakukan pengembangan dan inovasi dalam rangka optimasi desain dan efisiensi biaya pembangunan.
- 2) Pedoman desain bendungan beton *gravity* pada masing-masing negara memiliki konsep dan kriteria penerimaan tersendiri. Desain bendungan yang melibatkan perencana desain serta pedoman dan manual desain dari luar negeri harus dievaluasi kembali kesesuaiannya dengan pedoman desain yang berlaku di Indonesia,
- 3) Kriteria penerimaan desain dalam Pedoman SDA 2009 cukup konservatif pada kriteria penerimaan letak resultan fondasi kondisi pembebanan *unusual* karena ditetapkan sama dengan kondisi *usual* yaitu harus berada pada 1/3 dasar fondasi. Sebagai rekomendasi, kriteria letak resultan kondisi *unusual* dapat ditetapkan sama dengan USACE 2005 yaitu pada 1/2 dasar fondasi,

Tabel 4 Komparasi Kriteria Penerimaan Stabilitas Bendungan Beton Gravity.

Stability Parameters	Pedoman SDA 2009	USACE 2005	USBR 1976	FERC 2016	JSCE 2007	SL 319-2005	CDA 2013	NZSOLD 2015		
	Indonesia	United States	United States	United States	Japan	China	Canada	New Zealand		
Usual Condition										
Resultant location	Middle 1/3	Middle 1/3	N/A	N/A	Middle 1/3	N/A	Middle 1/3	Middle 1/3		
SF shear sliding	2,0	2,0 - 1,7	3,0	3,0	4,0	3,0	2,0 - 3,0	2,0 - 3,0		
Bearing pressure	≤ allowable	≤ allowable	≤ 1/4 UCS	≤ 1/3 UCS	≤ allowable	≤ allowable	≤ allowable	≤ allowable		
Static Unusual Condition										
Resultant location	Middle 1/3	Middle 1/2	N/A	N/A	Middle 1/3	N/A	Middle 1/2	N/A		
SF shear sliding	1,7	1,5 - 1,3		2,0	4,0	3,0	1,5 - 2,0			
Bearing pressure	≤ allowable	≤ allowable		≤ 1/2 UCS	≤ allowable	≤ allowable	≤ allowable			
Dynamic Unusual Condition with Seismic OBE										
Resultant location	Middle 1/3	Middle 1/2	N/A	N/A	Middle 1/3	N/A	N/A	Middle 1/2		
SF shear sliding	1,7	1,5 - 1,3			4,0			2,3	1,5 - 2,0	
Bearing pressure	≤ allowable	≤ 1,15 allowable			≤ allowable			≤ allowable	≤ allowable	
Static Extreme Condition with Maximum Flood										
Resultant location	Within base	Within base	N/A	N/A	Middle 1/3	N/A	Within base	Within base		
SF shear sliding	1,3	1,1			2,0		4,0	2,5	1,1 - 1,3	1,3 - 1,5
Bearing pressure	≤ 1,33 allowable	≤ 1,5 allowable			≤ 1/2,7 UCS		≤ allowable	≤ allowable	≤ allowable	≤ 1,33 allowable
Dynamic Extreme Condition with Seismic OBE										
Resultant location	Within base	Within base	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
SF shear sliding	1,3	1,1								
Bearing pressure	≤ 1,33 allowable	≤ 1,5 allowable								
Dynamic Extreme Condition with Seismic SEE										
Resultant location	Within base	Within base	N/A	N/A	N/A	N/A	Within base	Within base		
SF shear sliding	1,3	1,1					1,0	N/A	N/A	
Bearing pressure	≤ 1,33 allowable	≤ 1,5 allowable					≤ 1/1,3 UCS			
Post-earthquake Condition										
Resultant location	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Within base	Within base		
SF shear sliding				1,3			1,1 - 1,3	1,2		
Bearing pressure				≤ 1/1,3 UCS			≤ allowable	≤ allowable		

Sumber: Rangkuman Penulis

Tabel 5 Komparasi Kriteria Penerimaan Tegangan Bendungan Beton Gravity ($f_c' = 20$ MPa)

Allowable Stress	Pedoman SDA 2009	USBR 1976	FERC 2016	JSCE 2007	SL 319-2005	CDA 2013	NZSOLD 2015
	Indonesia	United States	United States	Japan	China	Canada	New Zealand
Usual Condition							
Compressive Stress	$0,3 f_c' = 6,0$	$0,33 f_c' = 6,6$	$0,33 f_c' = 6,6$	$0,25 f_c' = 5,0$	$0,25 f_c' = 5,0$	$0,3 f_c' = 6,0$	$0,3 f_c' = 6,0$
Tensile Stress	0	0	0	0	0	0	$0,05 f_c' = 1,0^{[3]}$
Static Unusual Condition							
Compressive Stress	$0,5 f_c' = 10,0$	[note ¹]	$0,5 f_c' = 10,0$	$0,32 f_c' = 6,4$	$0,25 f_c' = 5,0$	$0,5 f_c' = 10,0$	[note ¹]
Tensile Stress	$1,142 (f_c')^{2/3} = 0,8$		0	0	0	$0,05 f_c' = 1,0$	
Dynamic Unusual Condition with Seismic OBE							
Compressive Stress	$0,5 f_c' = 10,0$	[note ¹]	[note ¹]	$0,32 f_c' = 6,4$	$0,35 f_c' = 5,6$	[note ¹]	$0,5 f_c' = 10,0$
Tensile Stress	$1,142 (f_c')^{2/3} = 0,8$			$0,1 f_c' = 2,0$	$0,47 \times 0,1 f_c' = 0,9$		$1,5 \times 0,05 f_c' = 1,5^{[4]}$
Static Extreme Condition with Maximum Flood							
Compressive Stress	$0,9 f_c' = 18,0$	$0,5 f_c' = 10,0$	[note ¹]	$0,32 f_c' = 6,4$	$0,28 f_c' = 5,6$	$0,5 f_c' = 10,0$	$0,5 f_c' = 10,0$
Tensile Stress	$2,855 (f_c')^{2/3} = 2,1$	$0,05 f_c' = 1,0$		0	$0,25 \times 0,1 f_c' = 0,5$	$0,05 f_c' = 1,0$	$0,05 f_c' = 1,0^{[3]}$
Dynamic Extreme Condition with Seismic OBE							
Compressive Stress	$0,9 f_c' = 18,0$	[note ¹]	[note ¹]	[note ¹]	[note ¹]	[note ¹]	[note ¹]
Tensile Stress	$2,855 (f_c')^{2/3} = 2,1$						
Dynamic Extreme Condition with Seismic SEE							
Compressive Stress	$0,9 f_c' = 18,0$	$0,9 f_c' = 18,0$	[note ¹]	[note ¹]	[note ¹]	$0,9 f_c' = 18,0$	$0,9 f_c' = 18,0$
Tensile Stress	$2,855 (f_c')^{2/3} = 2,1$	$0,1 f_c' = 2,0$				$0,05 f_c' = 1,0$	$1,5 \times 0,05 f_c' = 1,5^{[4]}$
Post-earthquake Condition							
Compressive Stress	[note ¹]	[note ¹]	$0,77 f_c' = 15,4$	[note ¹]	[note ¹]	$0,5 f_c' = 10,0$	$0,5 f_c' = 10,0$
Tensile Stress			$1,7 (f_c')^{2/3} = 2,4^{[2]}$			$0,05 f_c' = 1,0$	$0,05 f_c' = 1,0^{[3,5]}$

Sumber: Rangkuman Penulis.

Keterangan Superscript:

- 1 : Tidak ditentukan batasan nilai tegangan izin untuk kondisi pembebanan tersebut.
- 2 : Apabila analisis dinamik mengindikasikan terjadi retak, pergeseran, atau *rocking*, maka tegangan izin dari analisis statik *post-earthquake* diizinkan kurang dari nilai tersebut.
- 3 : Tegangan tarik beton pada kondisi normal dibatasi sebesar $0,1 \times f_c'$ pada beton monolit dan $0,05 \times f_c'$ pada bidang *lift joint* beton.
- 4 : Tegangan tarik beton pada kondisi gempa diizinkan terjadi namun tidak boleh melampaui 1,5 kali besaran nilai batas pada tabel.
- 5 : Kondisi *post-earthquake* adalah bersifat sementara, setelah dilakukan perbaikan maka akan dilakukan evaluasi keamanan berdasarkan kriteria kondisi operasi normal.

- 4) Mengacu kepada kriteria penerimaan desain Pedoman SDA 2009, nilai faktor keamanan untuk stabilitas geser kondisi *extreme* ditetapkan minimal 1,3. Sebagai pertimbangan bahwa besaran nilai PGA gempa SEE di Indonesia adalah cukup besar, maka kebutuhan dimensi fondasi bendungan menjadi lebih besar dan secara finansial menjadi kurang ekonomis. Sebagai rekomendasi, kriteria penerimaan stabilitas geser untuk kondisi beban *extreme* yang melibatkan gempa SEE ditetapkan sama dengan USACE 2005 yaitu 1,1 apabila tidak disertai dengan analisis *post-earthquake* dan sebagai pengecualian diizinkan <1,0 apabila disertai dengan analisis *post-earthquake* yang hasilnya dapat menunjukkan bahwa bendungan tetap aman setelah mengalami kejadian gempa SEE, dan
- 5) Analisis kondisi *post-earthquake* dapat menjadi solusi pembangunan bendungan beton *gravity* yang lebih ekonomis secara finansial dan tetap aman secara desain karena kriteria keamanan desain dievaluasi bukan selama kejadian gempa, namun setelah terjadinya gempa. Sebagai pertimbangan bahwa guncangan gempa sifatnya *oscillatory nature* yaitu getaran bolak-balik yang terjadi dalam waktu yang sangat singkat, maka kondisi kritis pada stabilitas bendungan akan terjadi bukan pada saat kejadian gempa, namun pada kondisi setelah gempa. Untuk penjabaran analisis *post-earthquake* lebih lanjut dapat mereferensi kepada FERC 2016 dan NZSOLD 2015.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada PT Poso Energy sebagai tempat belajar dan berkarya serta kepada seluruh rekan *civil engineer* atas kesempatan dan dukungan yang diberikan sehingga jurnal ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Australian National Committee on Large Dams. (1998). *Guidelines for Design of Dams for Earthquake*. Australia.

Bureau of Indian Standards. (2019). *Criteria for Design of Solid Gravity Dams*, IS 6512-2019. New Delhi, India.

Canadian Dam Association. (2013). *Dam Safety Guidelines 2007 (2013 Edition)*. Canada. ISBN: 9878-0-9936319-0-0.

Comite Francais des Barrages et Reservoirs. (2012). *Recommendations for Justification of Gravity Dam Stability* (in French). France.

Kementerian Pekerjaan Umum. (2009). *Analisis Dinamik Bendungan Beton Gaya Berat*. Direktorat Jenderal SDA. Jakarta, Indonesia.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Buku 25 Tahun Organisasi Keamanan Bendungan Indonesia*. Direktorat Jenderal SDA. Jakarta: PT Gading Media Utama. ISBN: 978-602-60958-4-8.

Federal Energy Regulatory Commission. (2016). *Gravity Dams, Engineering Guidelines, Chapter III*. America.

International Commission on Large Dams B.117. (2000). *The Gravity Dam - A Dam for The Future*. Paris, France.

International Commission on Large Dams B.148. (2016). *Selecting Seismic Parameters for Large Dams*. Paris, France.

Japan Society of Civil Engineers. (2007). *Dam Concrete*. Tokyo, Japan. ISBN: 978-4-8106-0755-0.

Cordier, M., Leger, P. (2017). *Structural Stability of Gravity Dams*, Georisk. Diakses dari: <http://mc.manuscriptcentral.com/ngrk>.

Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. (2005). *Design Standard for Concrete Gravity Dams*, SL 319-2005. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press. ISBN: 978-7-5509-0533-7.

Norges Vassdrags- og Energidirektorat. (2005). *Guidelines for Concrete Dams* (in Norwegian). Oslo, Norway.

New Zealand Society on Large Dams. (2015). *New Zealand Dam Safety Guidelines*. New Zealand. ISBN: 978-0-908960-65-1.

Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Puslitbang PUPR. ISBN: 978-602-5489-01-3.

Soedibyo. (2003). *Teknik Bendungan*, ed. ke-2. Jakarta: PT Pradnya Paramita. 402 hal. ISBN: 979-408-313-5.

The State Economic and Trade Commission, P.R. China. (1999). *Design Specification for Concrete Gravity Dams*, DL 5108-1999. China: China Electric Power Press.

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Gravity Dam Design*, EM 1110-2-2200. Springfield, America.

U.S. Army Corps of Engineers. (2005). *Stability Analysis for Concrete Structure*, EM 1110-2-2100. Springfield, America.

United States Department of the Interior. (1976). *Design of Gravity Dams*. Bureau of Reclamation. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office.