

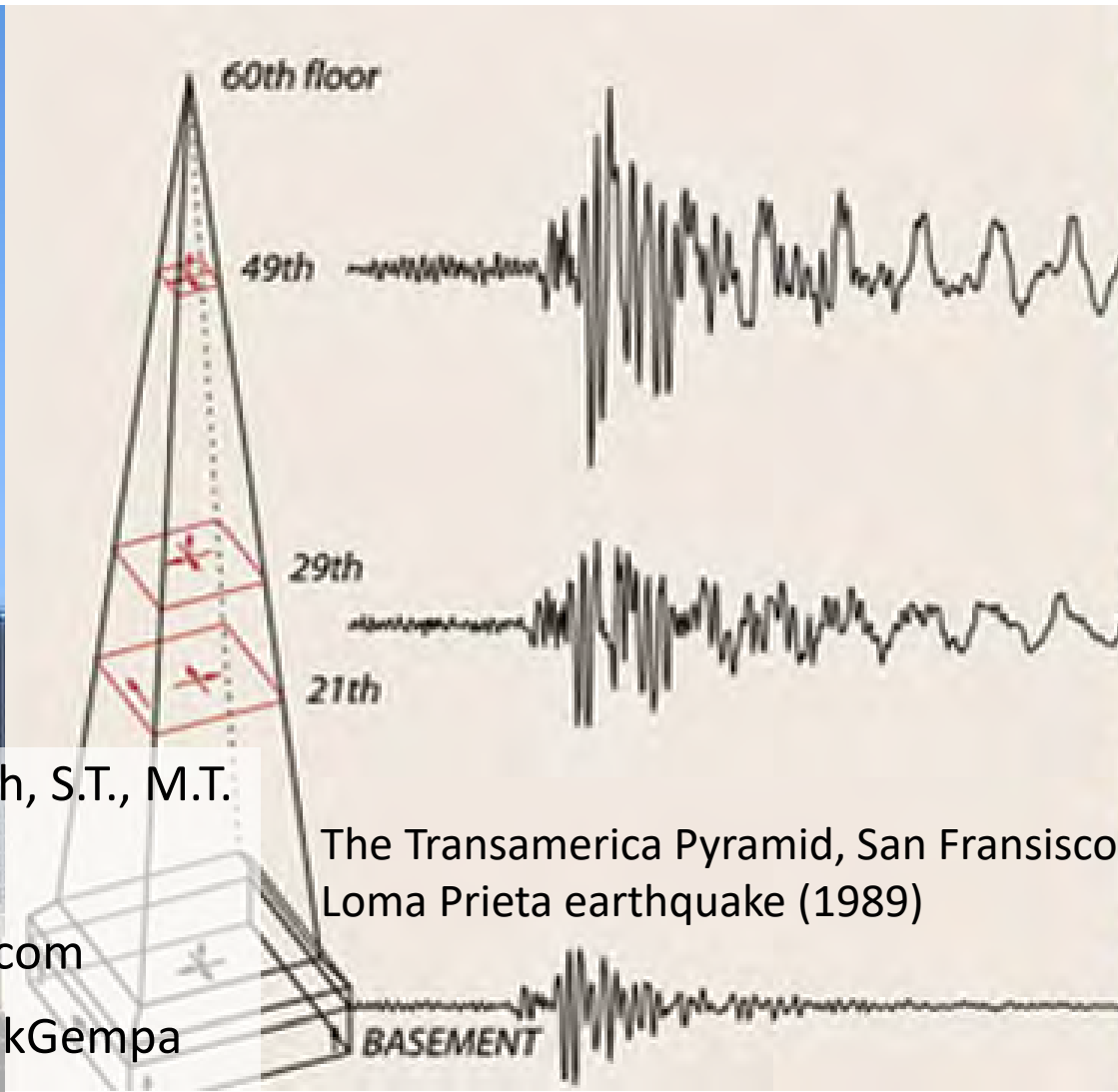


TKS 420214

M-06 Analisis Kegempaan,
Equivalent Static Method

Dinamika Struktur dan Gempa

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya



Pengajar: Dr. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.

Phone: 081373672011

E-mail: hana.program.17@gmail.com

Available on: <http://bit.ly/DinstrukGempa>

Jenis prosedur analisis kegempaan:

- *Linear Static Analysis* atau *Equivalent Static Method*
- *Nonlinear Static Analysis* atau *Pushover Analysis*
- *Linear Dynamic Analysis* atau *Response Spectrum Method*, terdiri dari:
 - *Absolute Sum Method*
 - *Square Root Sum of Squares (SRSS)*
 - *Complete Quadratic Combination (CQC)*
- *Nonlinear Dynamic Analysis* atau *Time History Analysis*

ILMU ALAT PENGABDIAN



Linear Static Analysis
(disebut juga sebagai *Equivalent Static Method*)

Cara ke-1: Pengambilan data *respons spectra* dari website <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id>

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Peta Google Peta MCE_G Peta MCE_R (S_S) Peta MCE_R (S₁) Peta C_R (C_{RS}) Peta C_R (C_{R1}) Grafik Respon Spektra Formula Resource

Credits

Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021
© 2021 PuSGeN, DBTPP, Ditjen Cipta Karya, Kementerian PUPR
Requirement : Windows 8/10, VGA Screen 800x600

Tim Pengarah Aplikasi:
Ir. Dian Irawati, M.T. (Direktur Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, KEMENTERIAN PUPR)
Prof. Masyhur Irsyam, MSE, Ph.D (HATTI, ITB, AIPI)
Prof. Indra Djati Sidi (ITB)
Prof. Wayan Sengara MSCE PhD (AARGI, ITB)
Ir. Lutfi Faizal (DBTPP – Kementerian PUPR)
Dr. M. Asrurifak (HATTI, ISTN)
Dr. Ir. Windu Partono, MSc. (UNDIP)
Dr. Ir. Mohammad Ridwan (DBTPP – Kementerian PUPR)

Tim Pengembangan Aplikasi :
Dr. Ir. Nathan Madutujuh, M.Sc.
James Asrah Immanuel, S.Kom
I Ketut Adi Wicaksana, S.Kom

Tim IT:
Junjun Muhammad Junjuna, ST. (DBTPP – Kementerian PUPR)
Anindwiyana Dian Panduwijaya, A.Md. (DBTPP – Kementerian PUPR)

Aplikasi ini mengacu pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 yang disusun oleh Tim Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) , Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Balitbang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:
-6.166667

Bujur:
106.816667

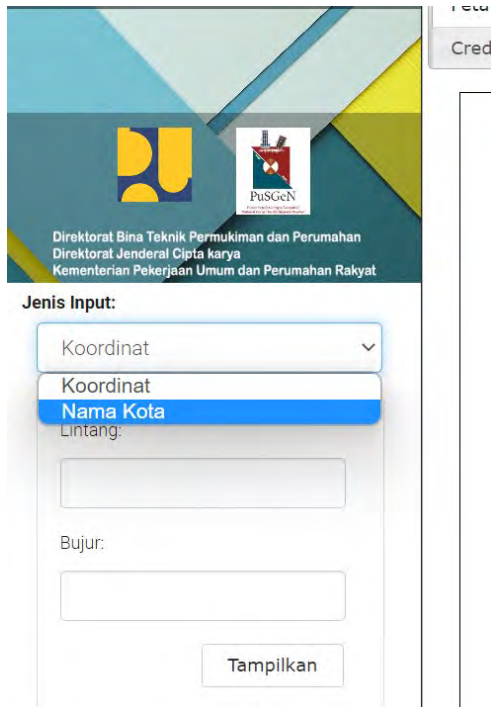
Tampilkan



Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

- Lokasi bangunan gedung adalah di Jakarta, jenis tanah lunak (E).
- **Koefisien kegempaan dan Respons Spektra** untuk suatu lokasi di Indonesia dapat diperoleh dari program di website Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat:

<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>, lalu pilih Aplikasi Respons Spektra 2021.



Jenis Input:

Koordinat

Koordinat

Nama Kota

Lintang:


Bujur:

Tampilkan

- Pilih nama kota atau isi koordinat lokasi, klik Tampilkan!, maka akan muncul data koefisien kegempaan dan respons spektra.
- Pilih jenis batuan/tanah keras/tanah sedang/tanah lunak.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

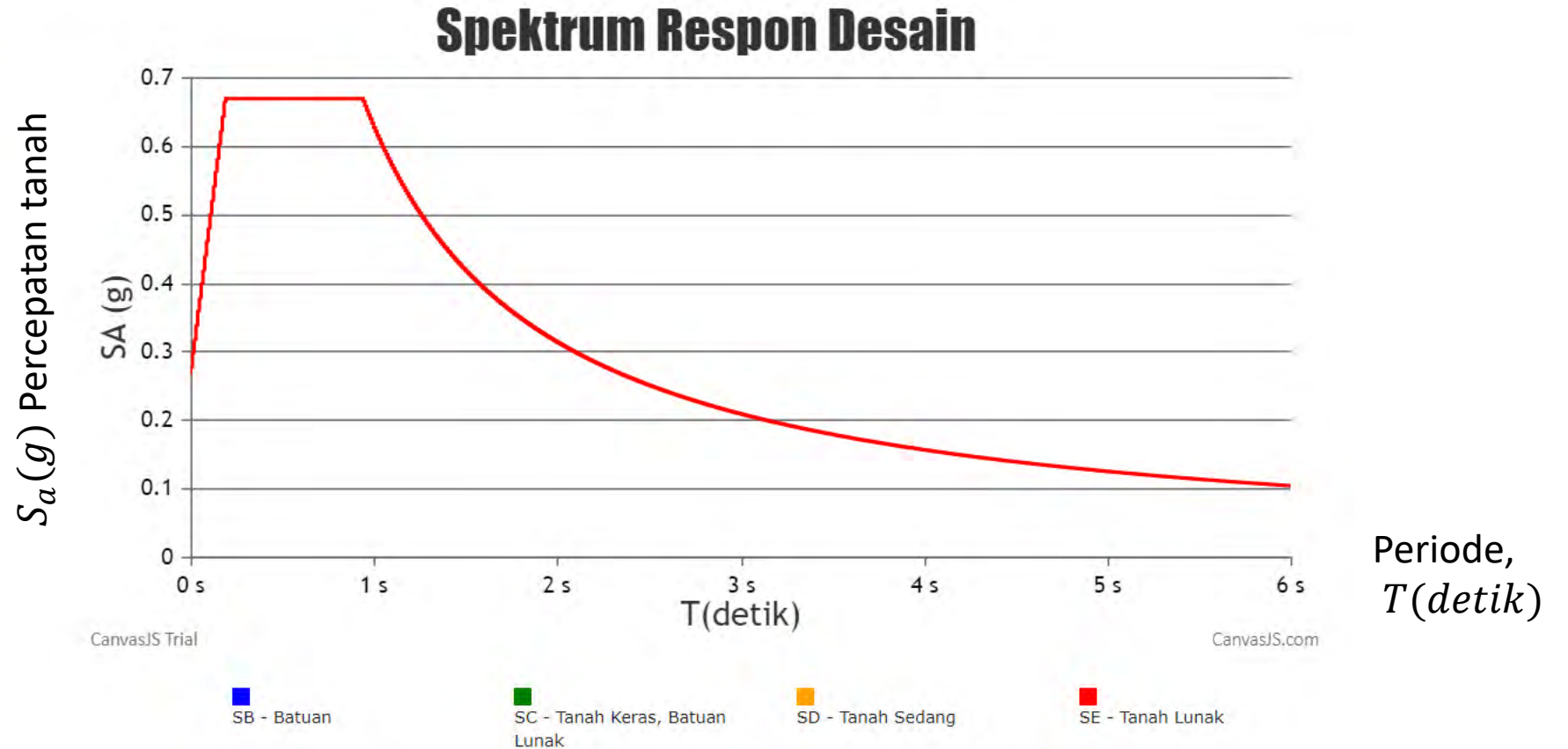
Lintang: -6.166667

Bujur: 106.816667

Tampilkan

Peta Google Peta MCE_G Peta MCE_R (S_S) Peta MCE_R (S₁) Peta C_R (C_{RS}) Peta C_R (C_{R1}) **Grafik Respon Spektra**

Credits



Grafik respons spektra Jakarta, tanah lunak

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Results: Tabel dibawah ini merupakan Parameter untuk membuat Grafik Desain Spektra Indonesia:

Kelas	SE - Tanah Lunak	T0(detik)	Ts(detik)	Sds(g)	Sd1(g)
Rentang T(s)	Value: 6	0.19	0.94	0.67	0.63
PGA MCEG	0.3727	(g) bedrock			
SS MCEr	0.7806	(g) bedrock			
S1 MCEr	0.3823	(g) bedrock			
TL	20	Detik			

Save

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google Peta MCE_G Peta MCE_R (S_S) Peta MCE_R (S₁) Peta C_R (C_{RS}) Peta C_R (C_{R1}) Grafik Respon Spektra **Formula** Resource

Credits

Tabel 6 – Koefisien situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE _R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_i					
	$S_i \leq 0,25$	$S_i = 0,5$	$S_i = 0,75$	$S_i = 1,0$	$S_i = 1,25$	$S_i \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)					

CATATAN:

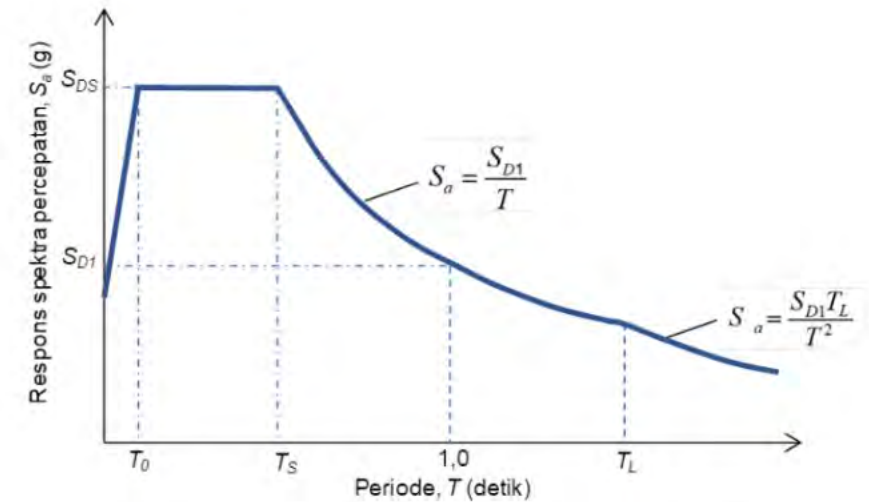
(a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Tabel 7 – Koefisien situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE _R) terpetakan pada periode 1 detik, S_i					
	$S_i \leq 0,1$	$S_i = 0,2$	$S_i = 0,3$	$S_i = 0,4$	$S_i = 0,5$	$S_i \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

CATATAN:

(a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

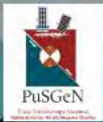


Gambar 3 – Spektrum respons desain

Tampilan website dengan referensi dari SNI 1726:2019

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google

Peta MCE_G

Peta MCE_R (S_S)

Peta MCE_R (S₁)

Peta C_R (C_{RS})

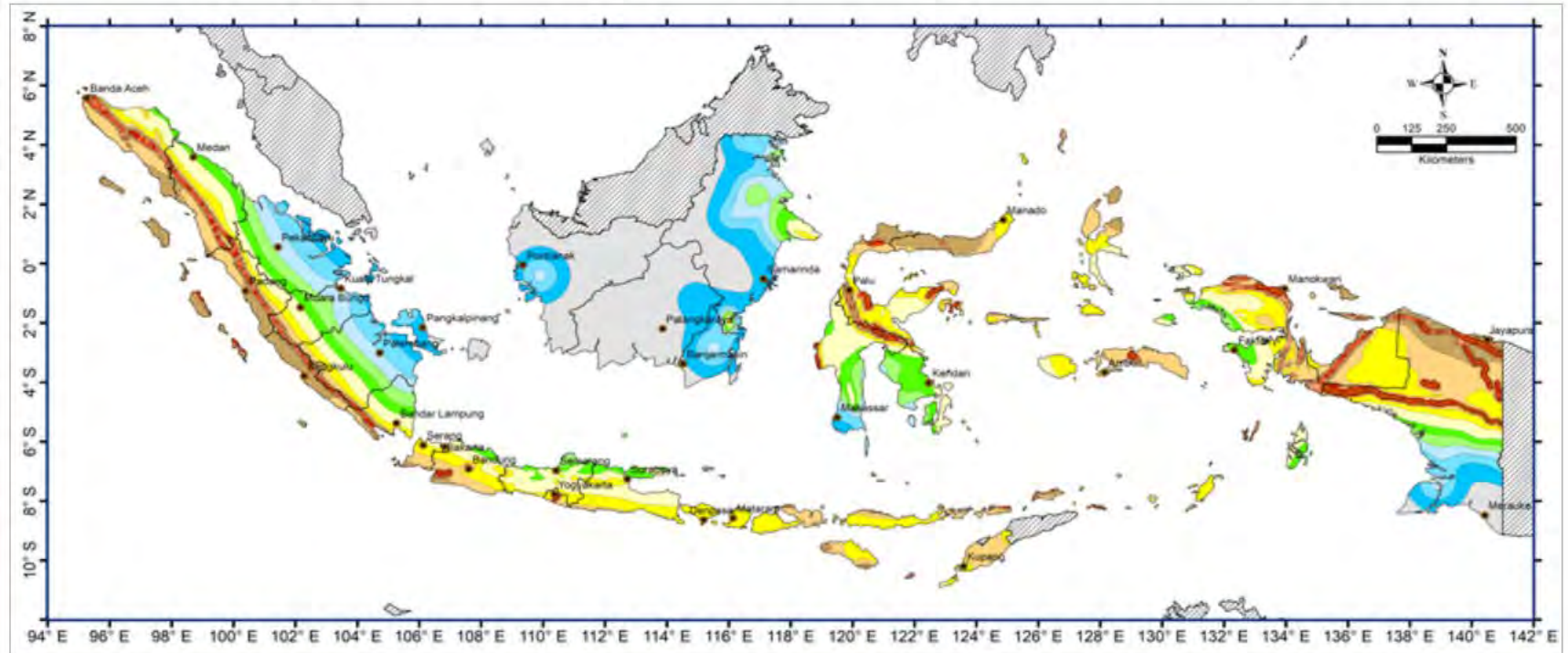
Peta C_R (C_{R1})

Grafik Respon Spektra

Formula

Resource

Credits



Keterangan (PGA, MCE₀):

	Area dengan spektrum respons percepatan konstan 60% g										
	0.1 - 0.15 g		0.25 - 0.3 g		0.5 - 0.6 g		0.8 - 0.9 g		1.2 - 1.5 g		
	< 0.05 g		0.15 - 0.2 g		0.3 - 0.4 g		0.6 - 0.7 g		0.9 - 1.0 g		> 1.5 g
	0.05 - 0.1 g		0.2 - 0.25 g		0.4 - 0.5 g		0.7 - 0.8 g		1.0 - 1.2 g		

Keterangan:

- Nilai Spektrum Respons Desain Indonesia pada aplikasi ini khusus untuk perhitungan pada bangunan saja sesuai SNI 1726:2019.
- Untuk nilai Spektrum Respons Desain di area dengan spektrum respon percepatan konstan sampai yang berdekatan dengan sesar aktif, harus dilakukan pengecekan.
- Seluruh akibat dari penggunaan hasil aplikasi ini adalah tanggung jawab penuh dari pengguna masing-masing.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google

Peta MCE_G

Peta MCE_R (S_S)

Peta MCE_R (S₁)

Peta C_R (C_{RS})

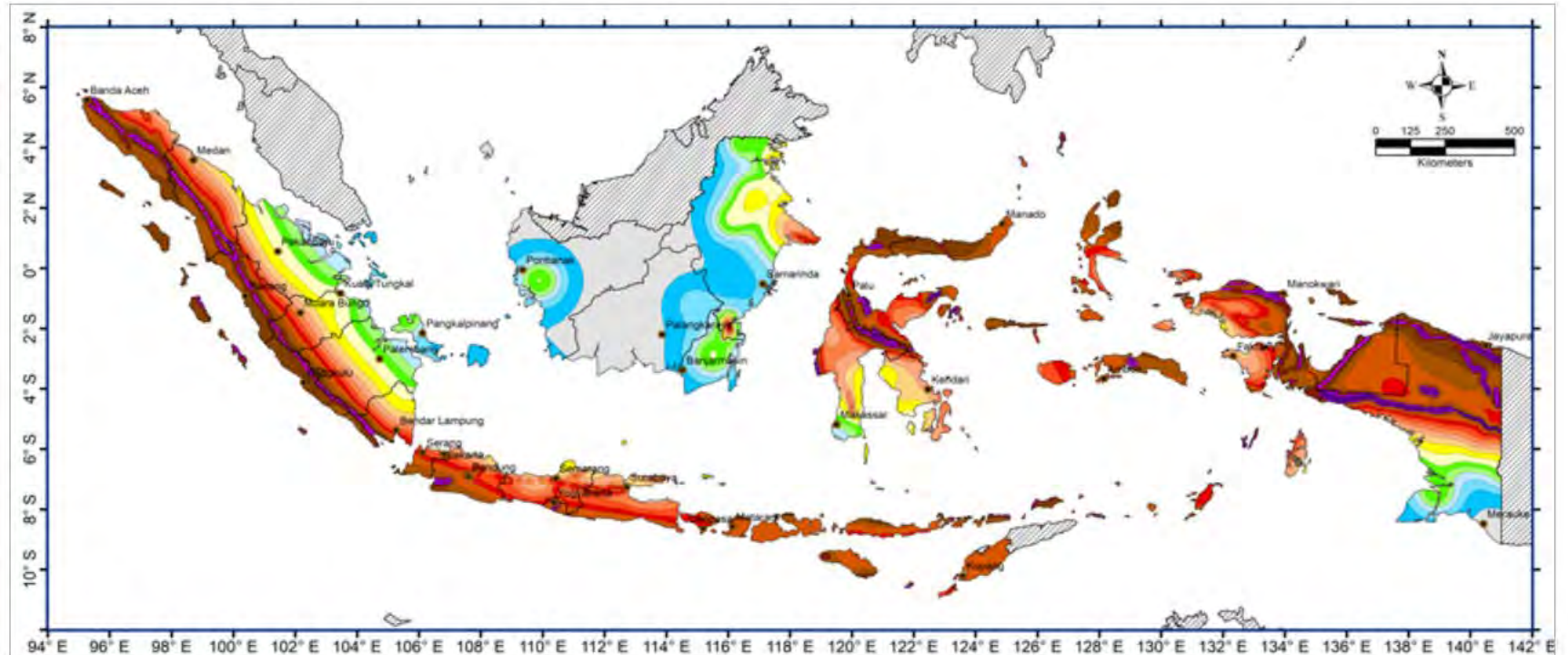
Peta C_R (C_{R1})

Grafik Respon Spektra

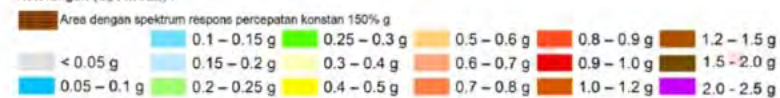
Formula

Resource

Credits



Keterangan (S_S, MCE_R):



Keterangan:

- Nilai Spektrum Respon Desain Indonesia pada aplikasi ini khusus untuk perhitungan pada bangunan saja sesuai SNI 1726:2019.
- Untuk nilai Spektrum Respon Desain di area dengan spektrum respon percepatan konstan sampai yang berdekatan dengan sesar aktif, harus dilakukan pengecekan.
- Seluruh akibat dari penggunaan hasil aplikasi ini adalah tanggung jawab penuh dari pengguna masing-masing.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Perumahan dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google

Peta MCE_G

Peta MCE_R (S_S)

Peta MCE_R (S₁)

Peta C_R (C_{RS})

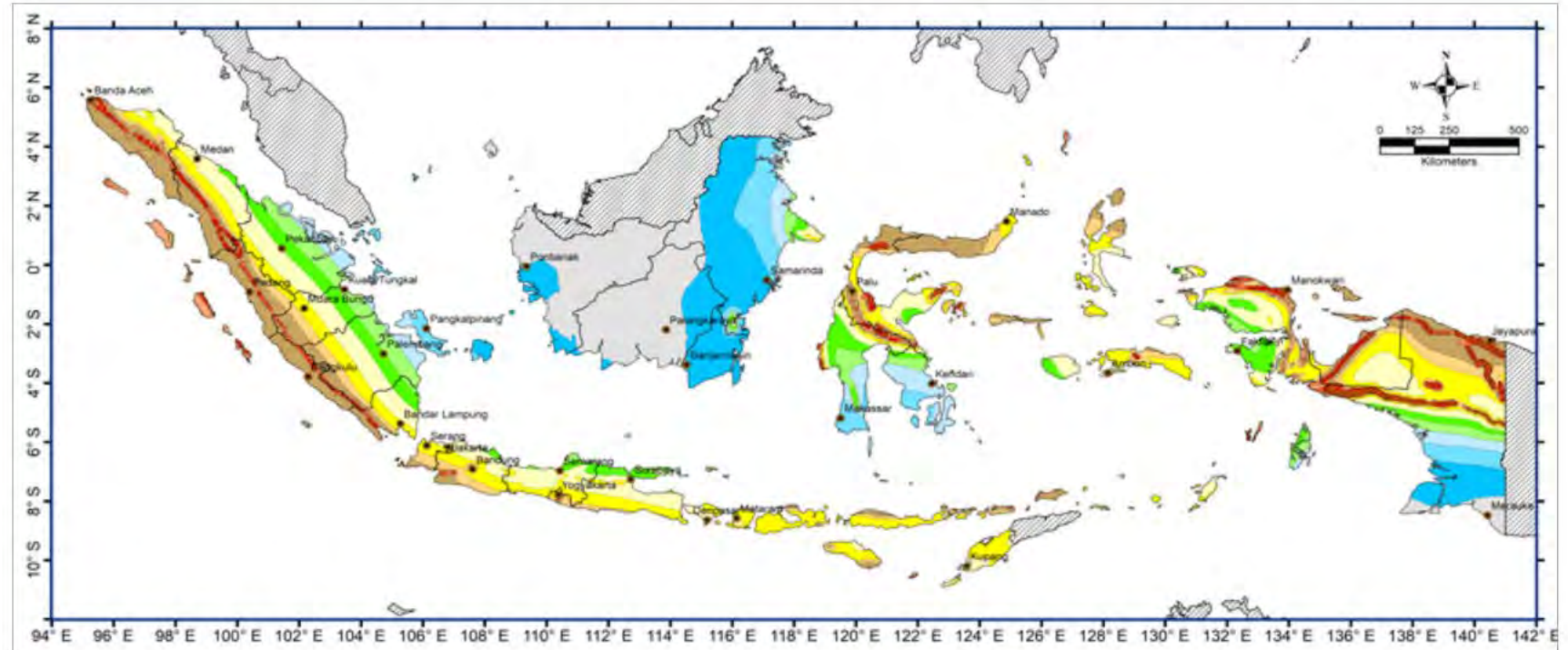
Peta C_R (C_{R1})

Grafik Respon Spektra

Formula

Resource

Credits



Keterangan (S₁, MCE_a):



Keterangan:

- Nilai Spektrum Respon Desain Indonesia pada aplikasi ini khusus untuk perhitungan pada bangunan saja sesuai SNI 1726:2019.
- Untuk nilai Spektrum Respon Desain di area dengan spektrum respon percepatan konstan sampai yang berdekatan dengan sesar aktif, harus dilakukan pengecekan.
- Seluruh akibat dari penggunaan hasil aplikasi ini adalah tanggung jawab penuh dari pengguna masing-masing.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google

Peta MCE_G

Peta MCE_R (S_S)

Peta MCE_R (S₁)

Peta C_R (C_{RS})

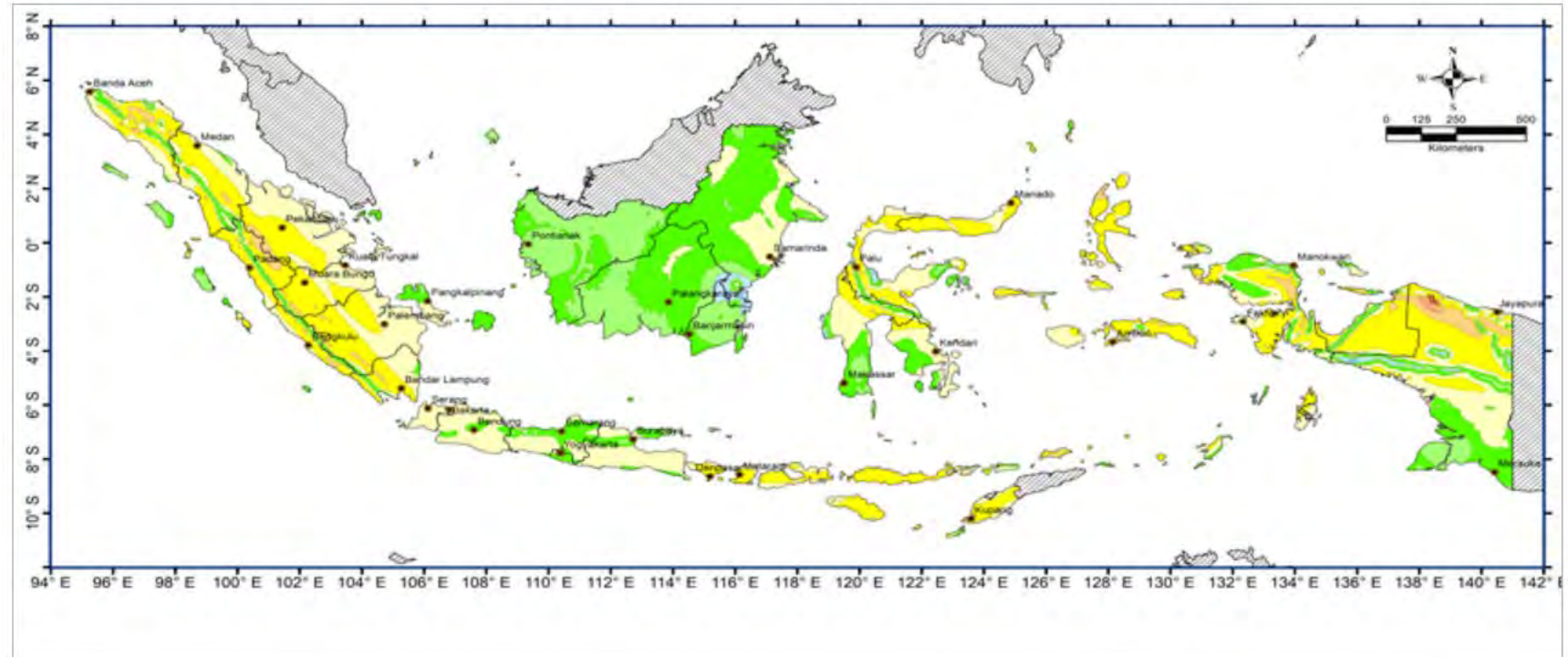
Peta C_R (C_{R1})

Grafik Respon Spektra

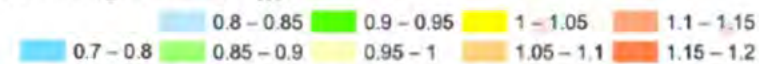
Formula

Resource

Credits



Keterangan: Nilai C_{R1}



Keterangan:

- Nilai Spektrum Respon Desain Indonesia pada aplikasi ini khusus untuk perhitungan pada bangunan saja sesuai SNI 1726:2019.
- Untuk nilai Spektrum Respon Desain di area dengan spektrum respon percepatan konstan sampai yang berdekatan dengan sesar aktif, harus dilakukan pengecekan.
- Seluruh akibat dari penggunaan hasil aplikasi ini adalah tanggung jawab penuh dari pengguna masing-masing.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Desain Spektra Indonesia



Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Direktorat Jenderal Cipta karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

-6.166667

Bujur:

106.816667

Tampilkan

Peta Google

Peta MCE_G

Peta MCE_R (S_S)

Peta MCE_R (S₁)

Peta C_R (C_{RS})

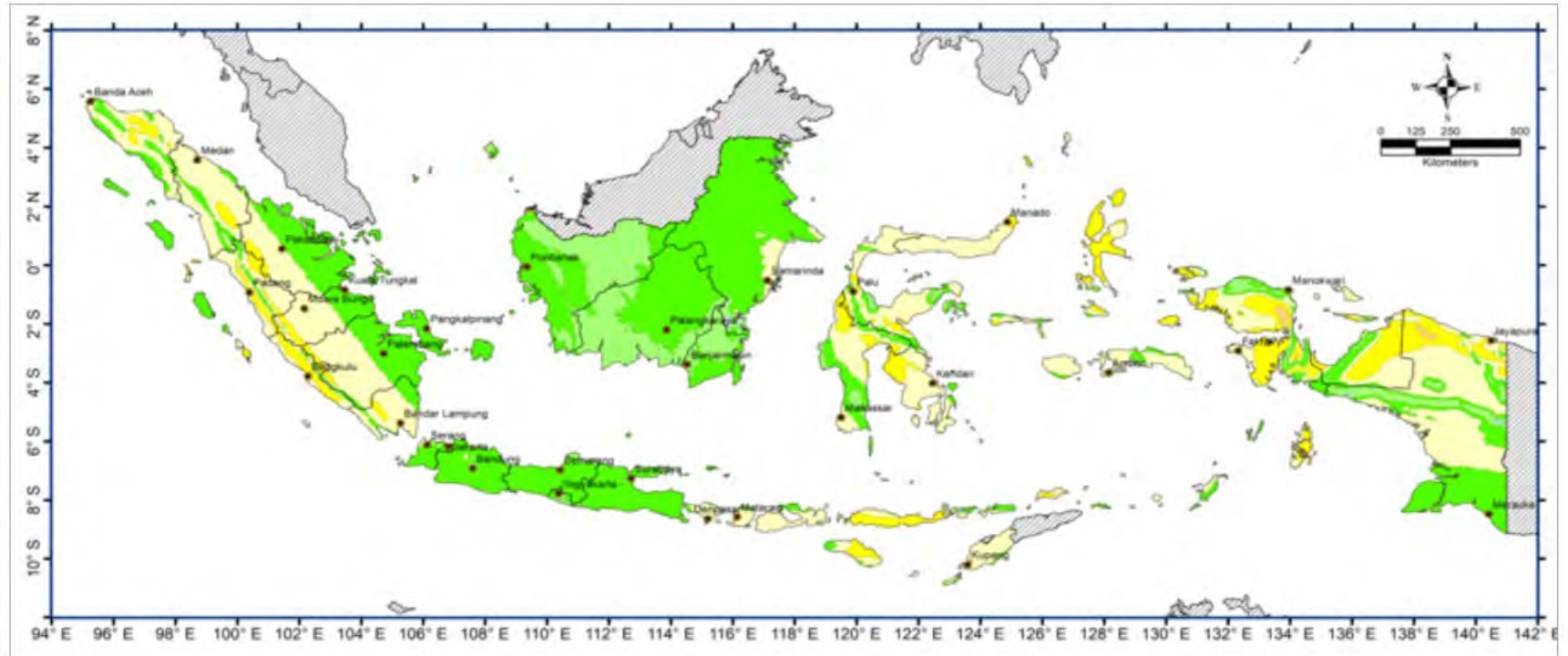
Peta C_R (C_{R1})

Grafik Respon Spektra

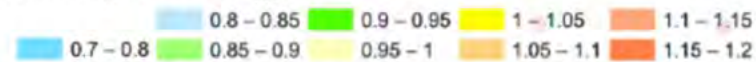
Formula

Resource

Credits



Keterangan: Nilai C_{R1}



Keterangan:

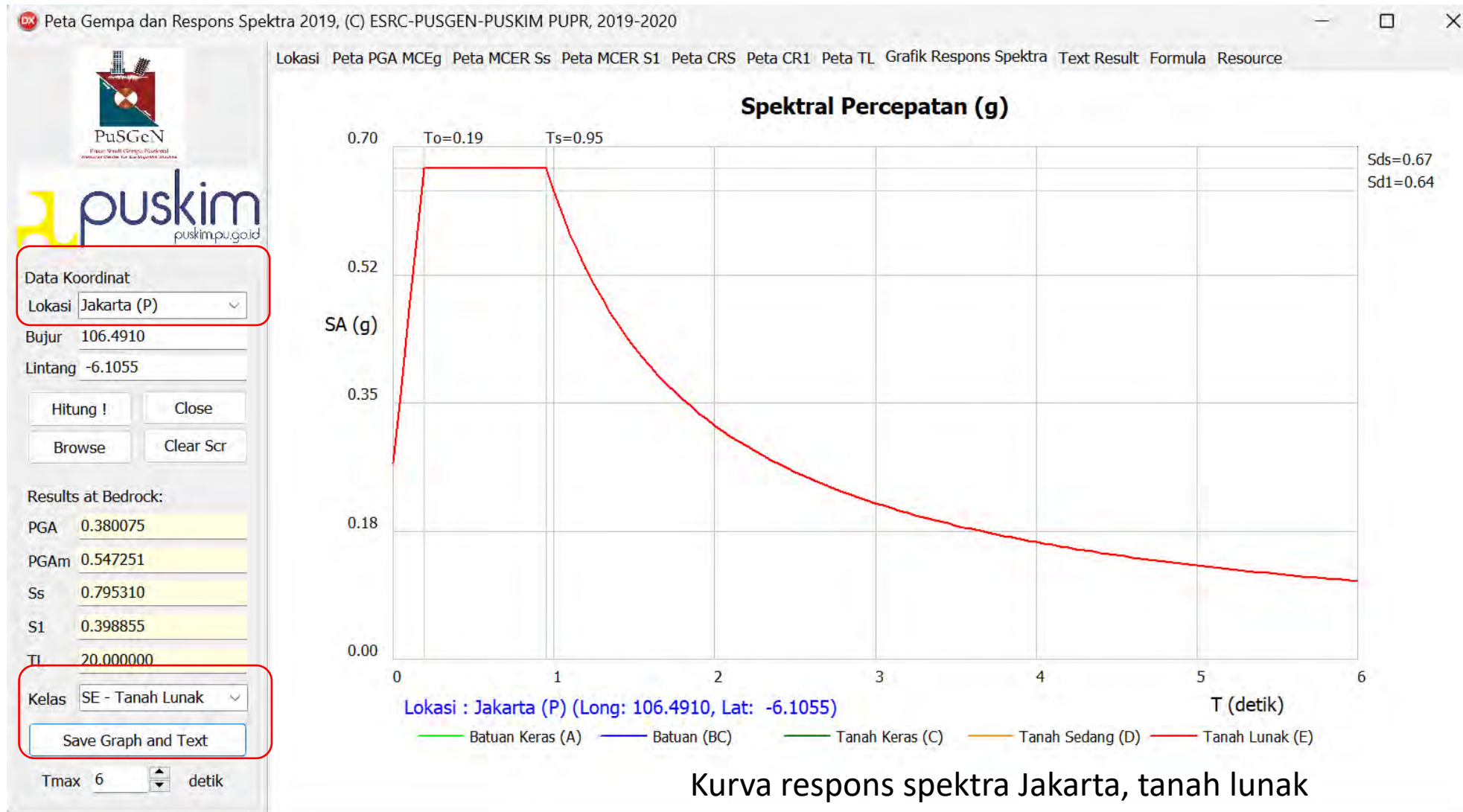
- Nilai Spektrum Respon Desain Indonesia pada aplikasi ini khusus untuk perhitungan pada bangunan saja sesuai SNI 1726:2019.
- Untuk nilai Spektrum Respon Desain di area dengan spektrum respon percepatan konstan sampai yang berdekatan dengan sesar aktif, harus dilakukan pengecekan.
- Seluruh akibat dari penggunaan hasil aplikasi ini adalah tanggung jawab penuh dari pengguna masing-masing.

Cara ke-2: Pengambilan data respons spectra dari software

<http://bit.ly/DinstrukGempa> folder Program Gempa Indonesia 2021_Produk PuSGeN

Run as administrator

atau https://drive.google.com/drive/folders/1Cuexl2uu2Xqz0nLHTYXIBx91M_CNhZ9m



RSA2018

File Edit View

Program Respons Spektra Peta Gempa Indonesia 2019
(C) Copyright Puskim-PusGeN-ESRC, 2019-2020

Nama Kota : Jakarta (P)
 Bujur / Longitude : 106.4910 Degrees
 Lintang / Latitude : -6.1055 Degrees

Kelas Situs : SE - Tanah Lunak

PGA = 0.380075 g
 PGAm = 0.547251 g
 CRs = 0.000000
 CR1 = 0.000000
 Ss = 0.795310 g
 S1 = 0.398855 g
 TL = 20.000000 detik
 Fa = 1.263752
 Fv = 2.404580
 Sms = 1.005075 g
 Sm1 = 0.959079 g
 Sds = 0.670050 g
 Sd1 = 0.639386 g
 T0 = 0.190847 detik
 Ts = 0.954236 detik

Periode, T (detik) S_a (g) Percepatan tanah

Time (sec)	Value (g)
0.000	0.2680
0.050	0.3733
0.100	0.4787
0.150	0.5840
0.191	0.6700
0.200	0.6700

RSA2018

File Edit View

4.450	0.1457
4.500	0.1421
4.550	0.1405
4.600	0.1390
4.650	0.1375
4.700	0.1360
4.750	0.1346
4.800	0.1332
4.850	0.1318
4.900	0.1305
4.950	0.1292
5.000	0.1279
5.050	0.1266
5.100	0.1254
5.150	0.1242
5.200	0.1230
5.250	0.1218
5.300	0.1206
5.350	0.1195
5.400	0.1184
5.450	0.1173
5.500	0.1163
5.550	0.1152
5.600	0.1142
5.650	0.1132
5.700	0.1122
5.750	0.1112
5.800	0.1102
5.850	0.1093
5.900	0.1084
5.950	0.1075
6.000	0.1066



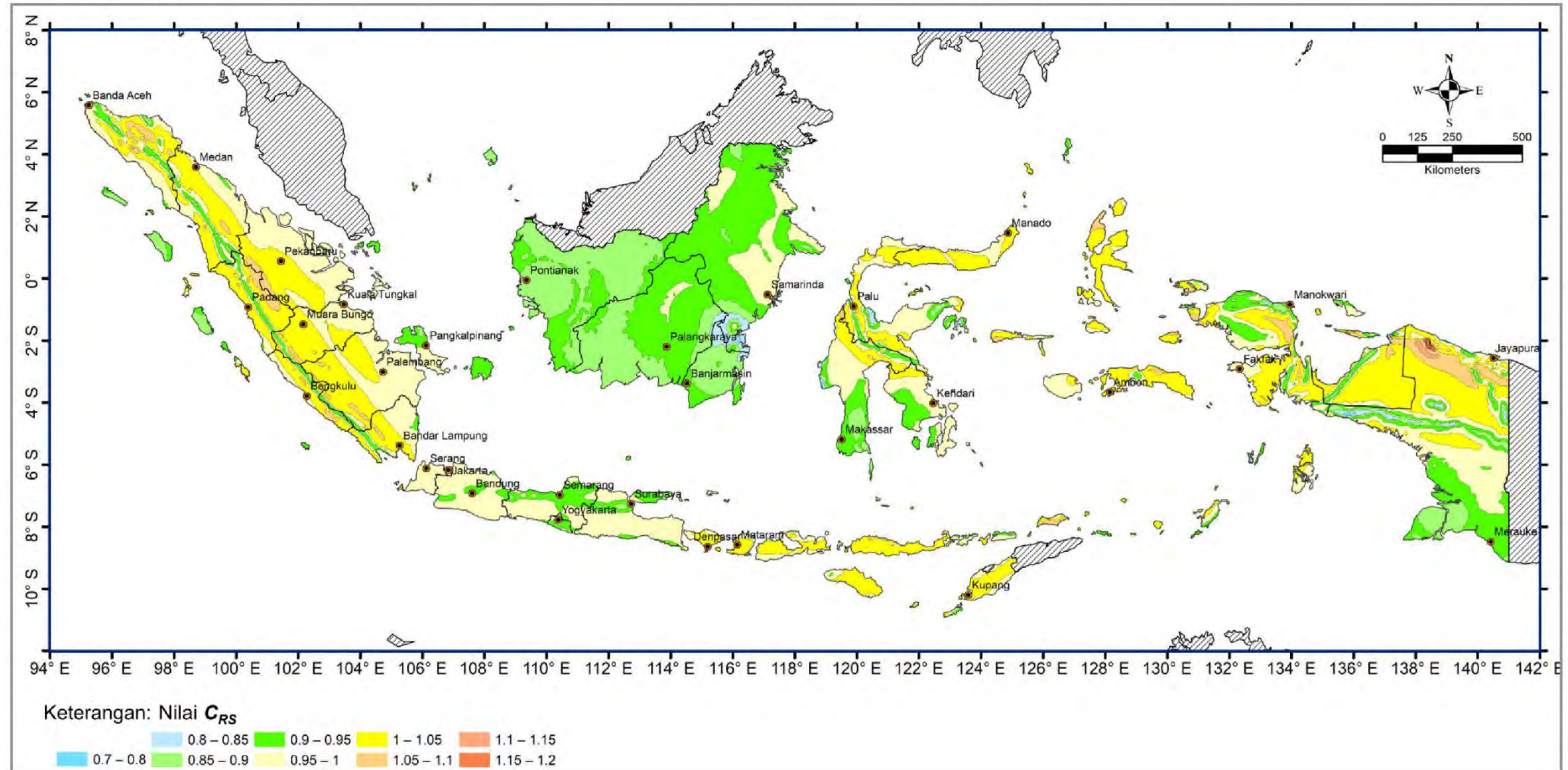
Seharusnya ada nilainya, bukan 0. Nilai CR_s dan CR_1 bisa diperoleh dari peta gempa

Linear Static Analysis atau *Equivalent Static Method*

- Nilai koefisien risiko C_R , harus ditentukan menggunakan nilai-nilai C_{RS} dan C_{R1} yang secara berturut-turut mengacu pada Gambar 18 dan Gambar 19.
- Pada periode-periode spektrum respons yang lebih kecil atau sama dengan 0,2 detik, maka C_R harus diambil sama dengan nilai C_{RS} , sedangkan untuk periode yang lebih besar dari 1 detik, C_R diambil sama dengan nilai C_{R1} .
- Pada periode spektrum respons lebih besar dari 0,2 detik dan lebih kecil dari 1 detik, nilai C_R harus didasarkan pada interpolasi linier nilai C_{RS} dan C_{R1} .

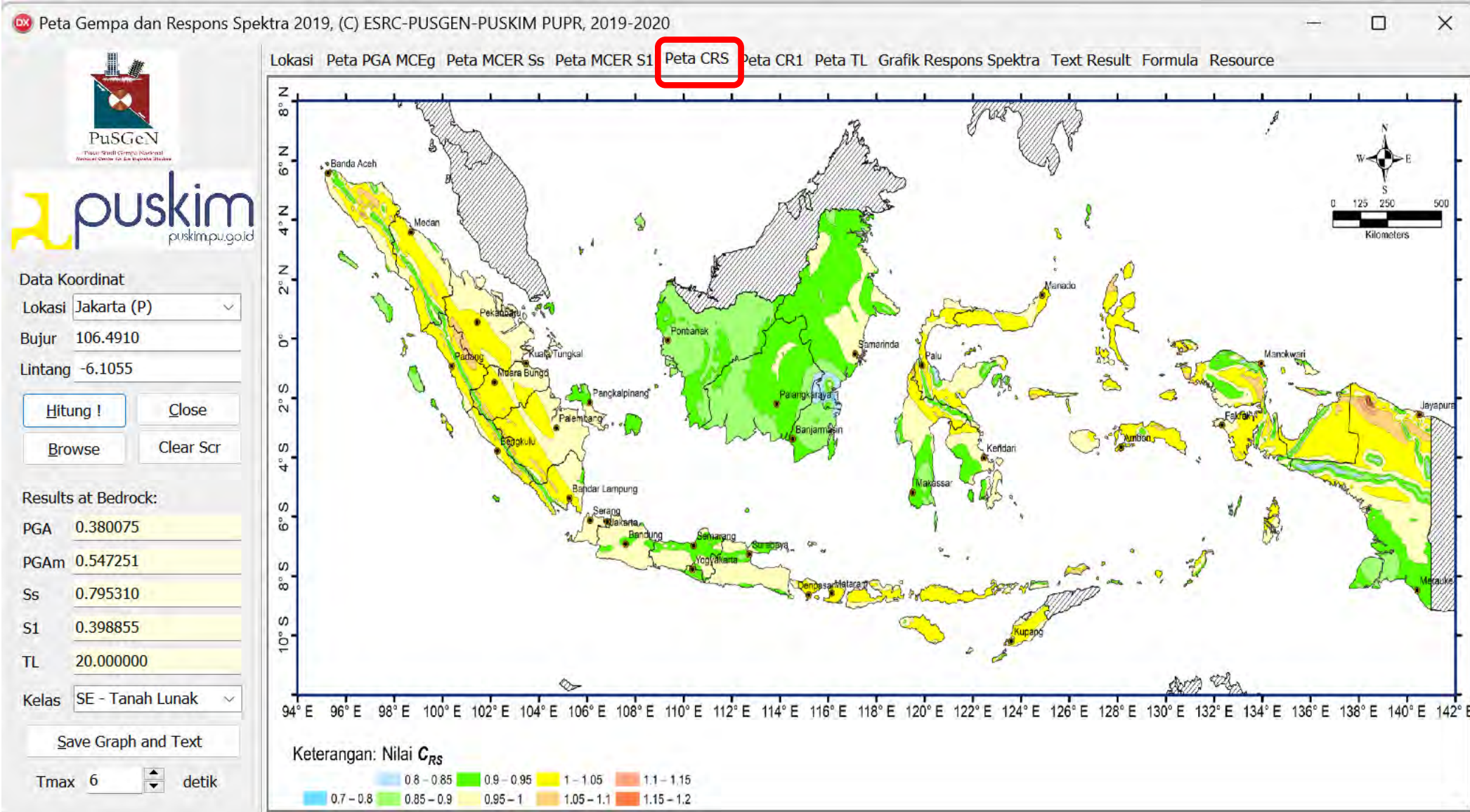
Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

SNI 1726:2019



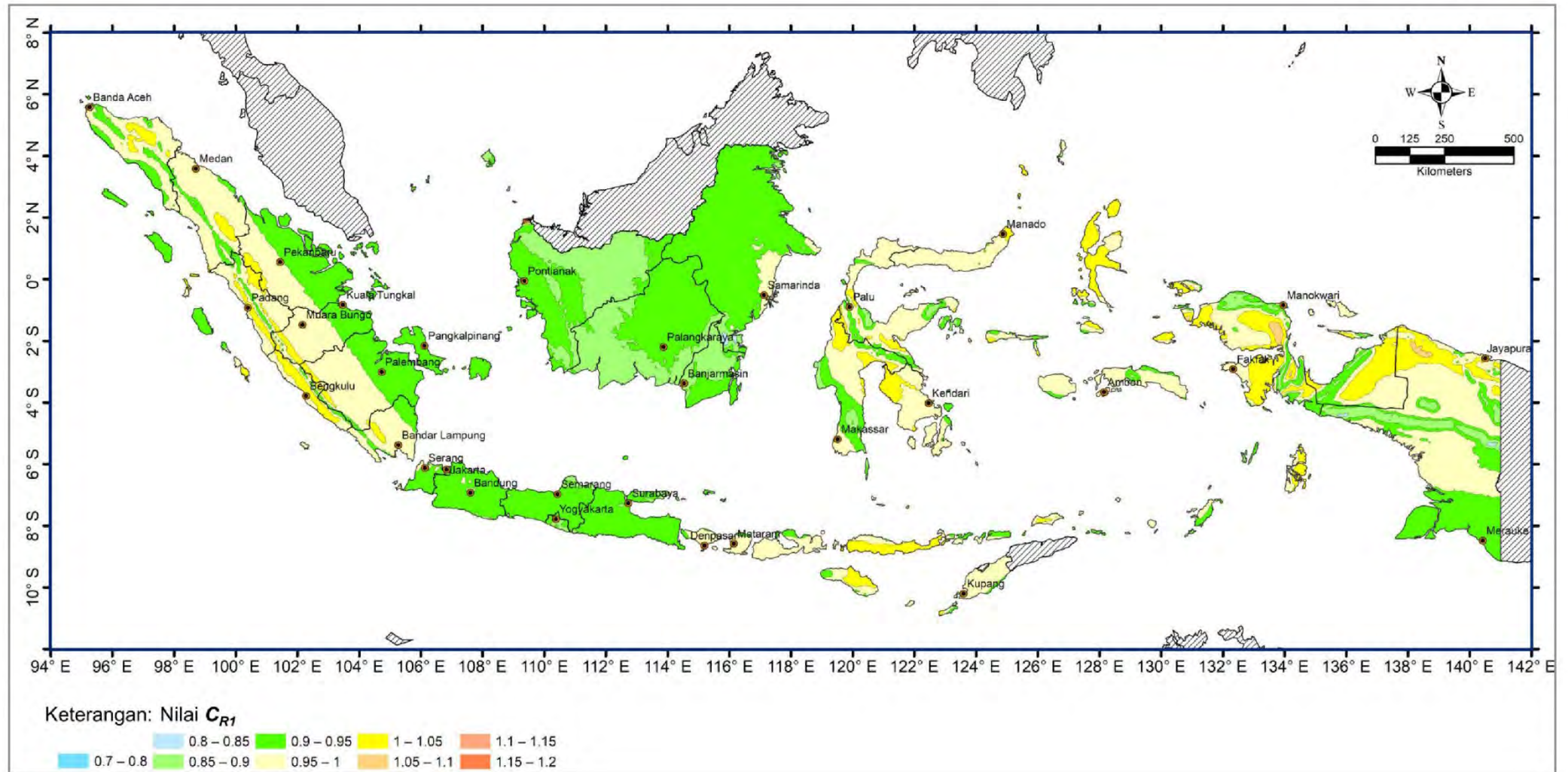
Gambar 18 – C_{RS} , Koefisien risiko terpetakan, periode spektrum respons 0,2-detik

Peta nilai C_{RS} di software



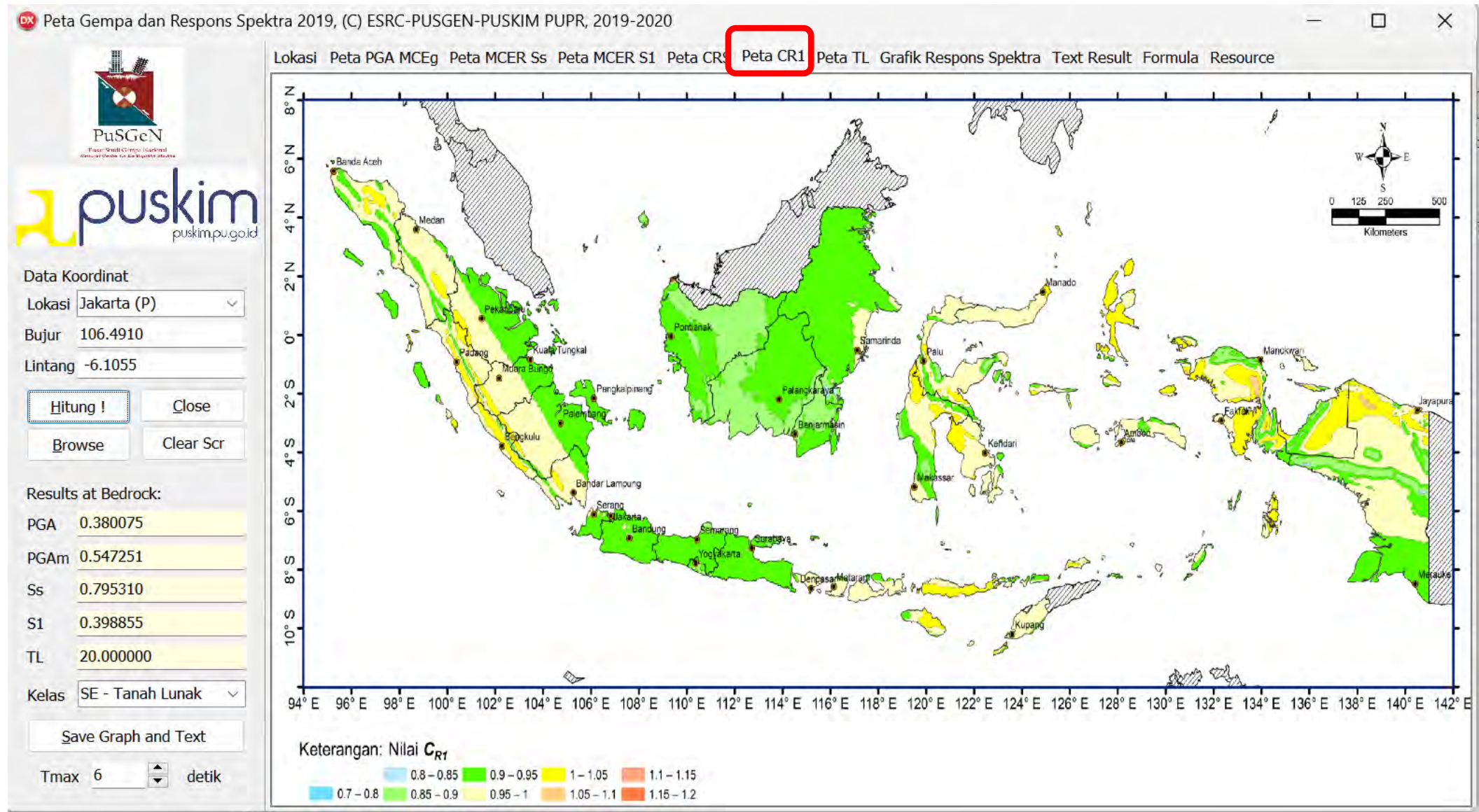
Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

SNI 1726:2019

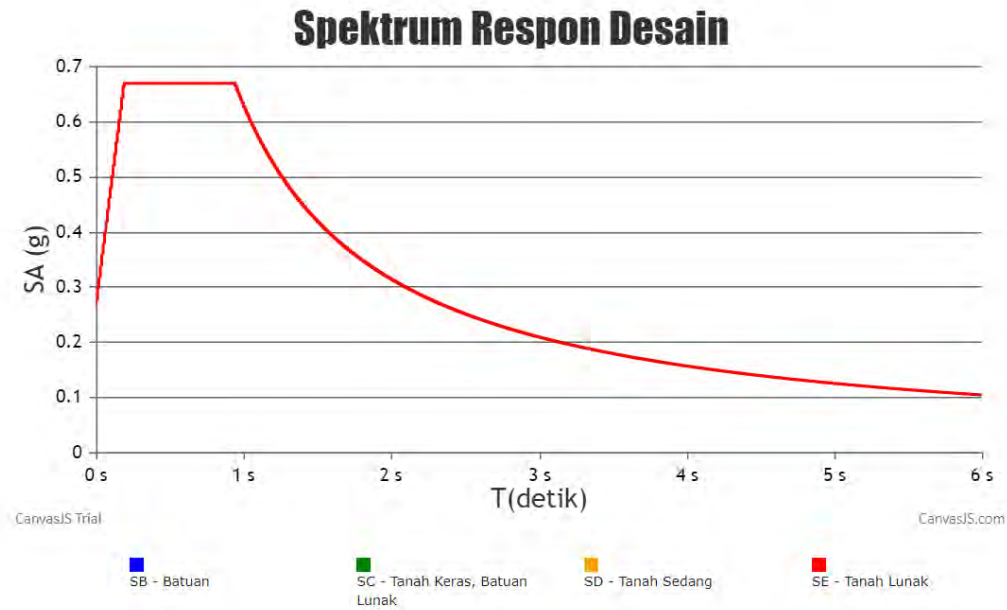


Gambar 19 – C_{R1} , Koefisien risiko terpetakan, periode respons spektral 1 detik

Peta nilai C_{RS} di software



Perbandingan grafik *respons spectra* dari *website* dan *software*



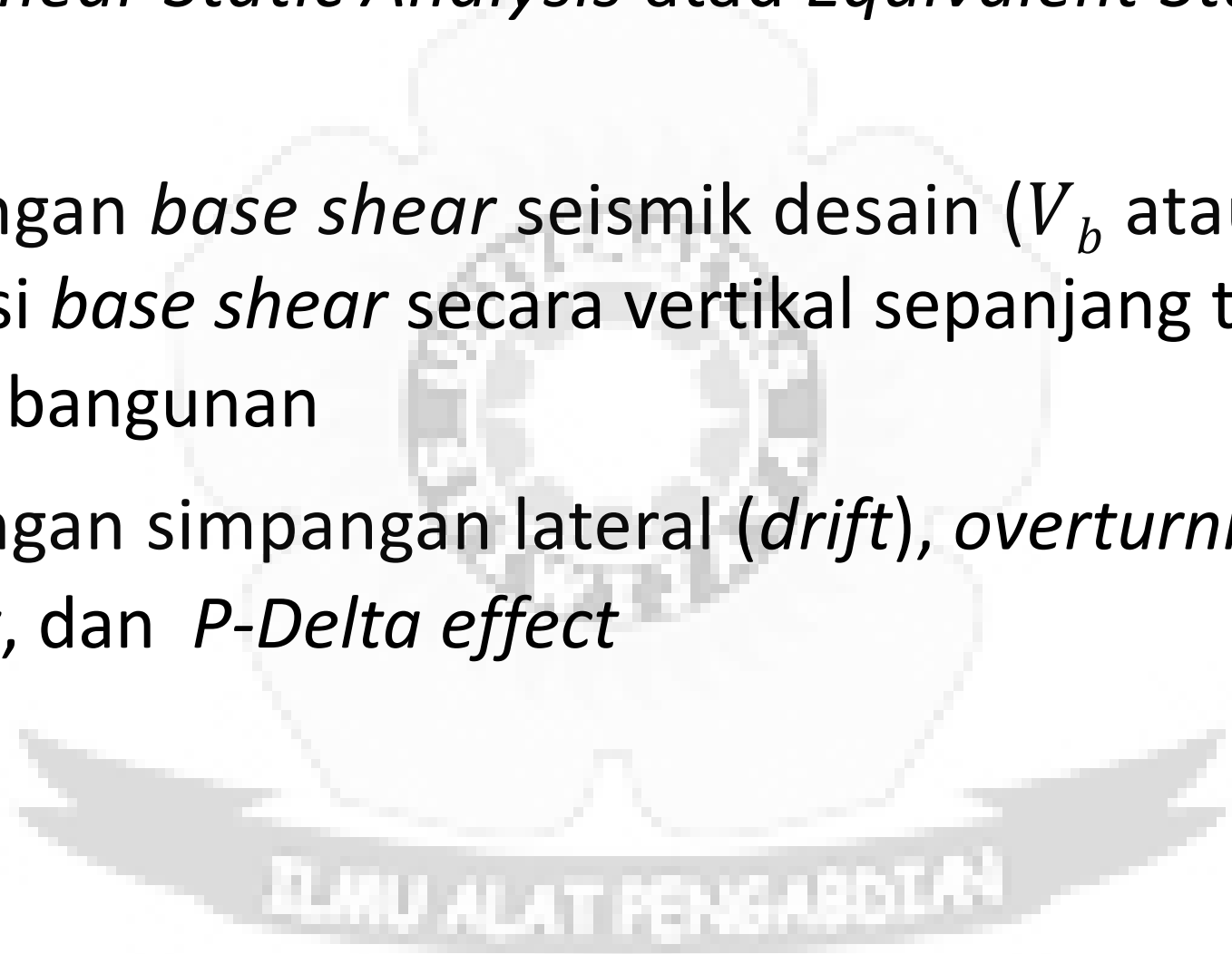
Contoh analisis *Linear Static Analysis* atau
Equivalent Static Method

Linear Static Analysis atau *Equivalent Static Method*

- ❖ Berdasarkan persamaan-persamaan yang terdapat dalam peraturan.
- ❖ Pada awal analisis, **base shear (gaya geser dasar)** diperhitungkan untuk keseluruhan bangunan, kemudian didistribusikan sepanjang tinggi gedung di setiap lantai.
- ❖ Setiap gaya yang didistribusikan pada suatu lantai kemudian didistribusikan pada elemen-elemen struktur lantai tersebut yang menahan beban lateral.

Prosedur *Linear Static Analysis* atau *Equivalent Static Method*

- Perhitungan *base shear* seismik desain (V_b atau V_{base})
- Distribusi *base shear* secara vertikal sepanjang tinggi struktur bangunan
- Perhitungan simpangan lateral (*drift*), *overturning moment*, dan *P-Delta effect*



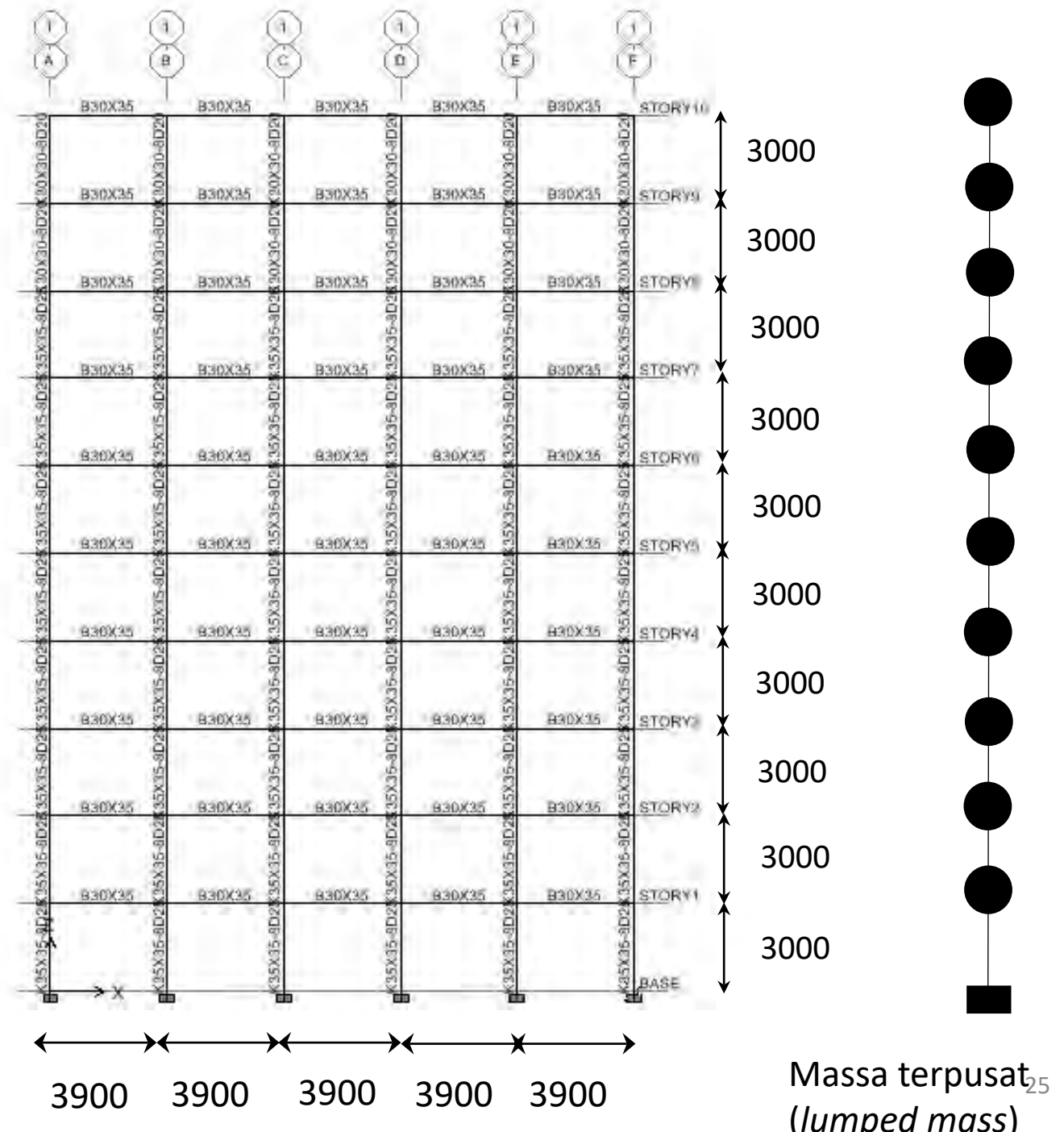
Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Distribusi vertikal *Base Shear* (V_B) pada setiap lantai pada struktur gedung beraturan.

Contoh perhitungan:

Suatu bangunan gedung 10 lantai terdiri dari rangka terbuka beton bertulang dan pelat beton, dengan dimensi balok, kolom, dan pelat masing-masing.

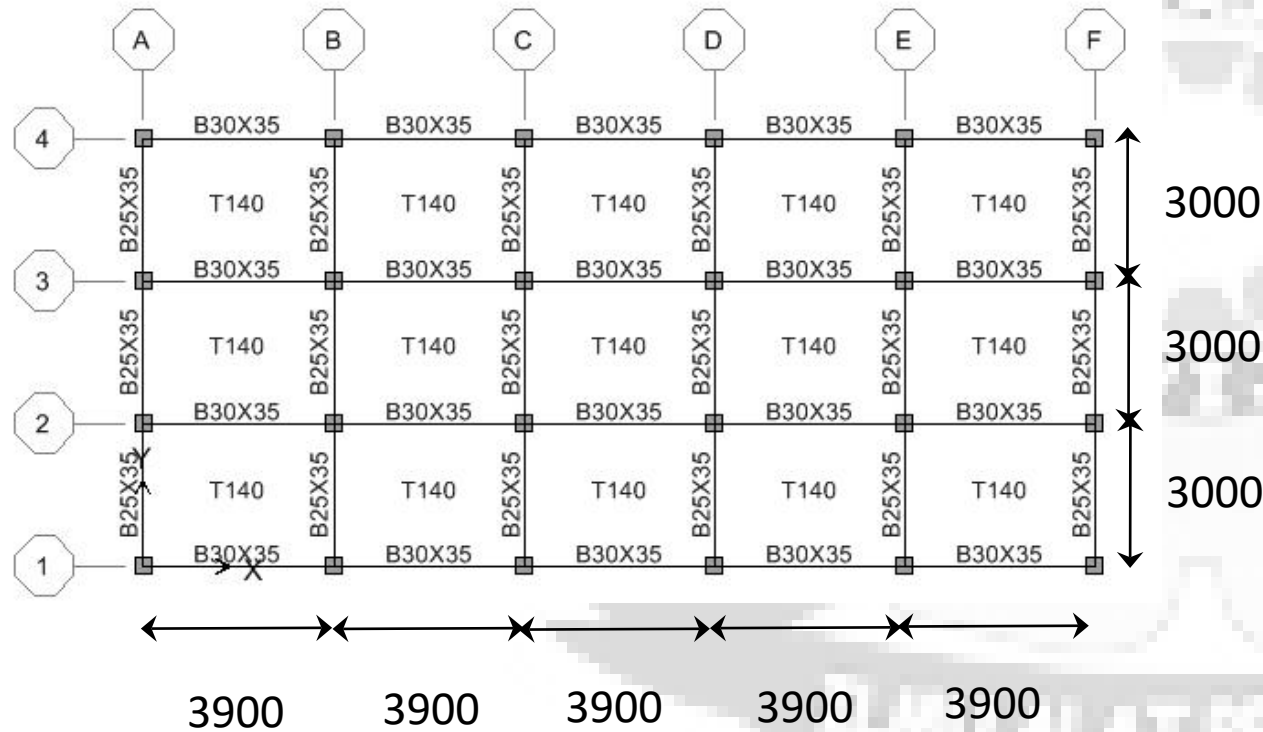
Satuan dimensi: mm



Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method



Utara



Denah Bangunan Gedung

Data bangunan gedung:

- Jumlah lantai : 10
- Balok ke arah sumbu X : 300 mm × 350 mm
- Balok ke arah sumbu Y : 250 mm × 350 mm
- Kolom *story-1* s.d. *story-8* : 350 mm × 350 mm
- Kolom *story-9* s.d. *story-10* : 300 mm × 300 mm
- Tinggi kolom setiap lantai (h_i) = 3,00 m (as ke as)
- Panjang balok ke arah sumbu x (L_x) = 3,90 m (as ke as)
- Panjang balok ke arah sumbu y (L_y) = 3,00 m (as ke as)

Panjang bentang balok bersih arah sumbu x *story-1* s.d. *story-8*:

$$l_n = L_x - b_{kolom} = 3,90 - 0,35 = 3,55 \text{ m}$$

Panjang bentang balok bersih arah sumbu x *story-9* s.d. *story-10*:

$$l_n = L_x - b_{kolom} = 3,90 - 0,30 = 3,60 \text{ m}$$

Panjang bentang balok bersih arah sumbu y *story-1* s.d. *story-8* :

$$l_m = L_y - b_{kolom} = 3,00 - 0,35 = 2,65 \text{ m}$$

Panjang bentang balok bersih arah sumbu y *story-9* s.d. *story-10* :

$$l_m = L_y - b_{kolom} = 3,00 - 0,30 = 2,70 \text{ m}$$

Tinggi kolom bersih:

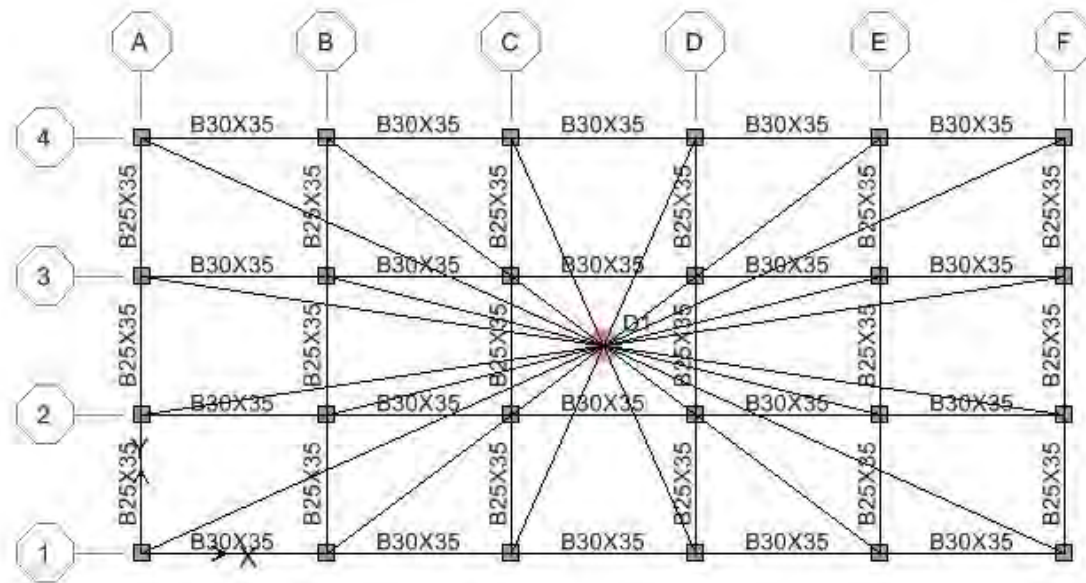
$$l_u = H_{kolom} - h_{balok} = 3,00 - 0,35 \text{ m} = 2,65 \text{ m}$$

Tebal pelat = 140 mm

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Diafragma pada program ETABS

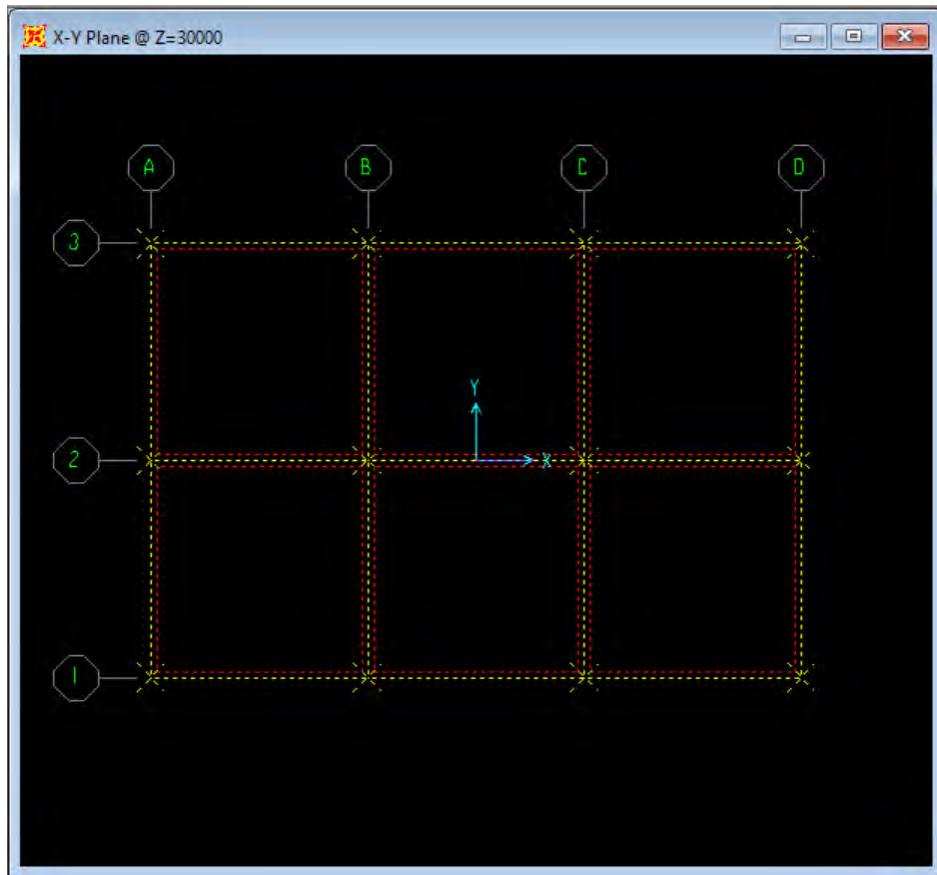
Dalam pemberian beban gempa (F), setiap lantai bangunan diset sebagai diafragma untuk menyatukan massa per lantai. Ada pelat lantai di antara balok.



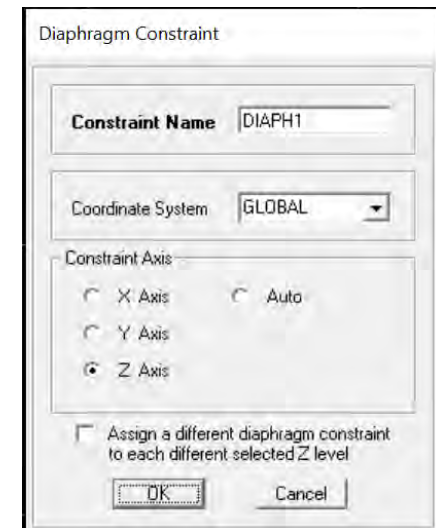
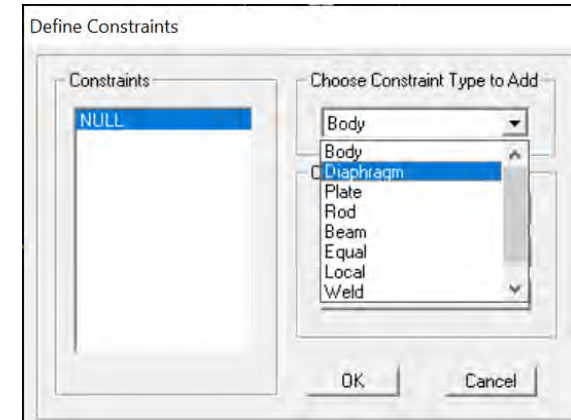
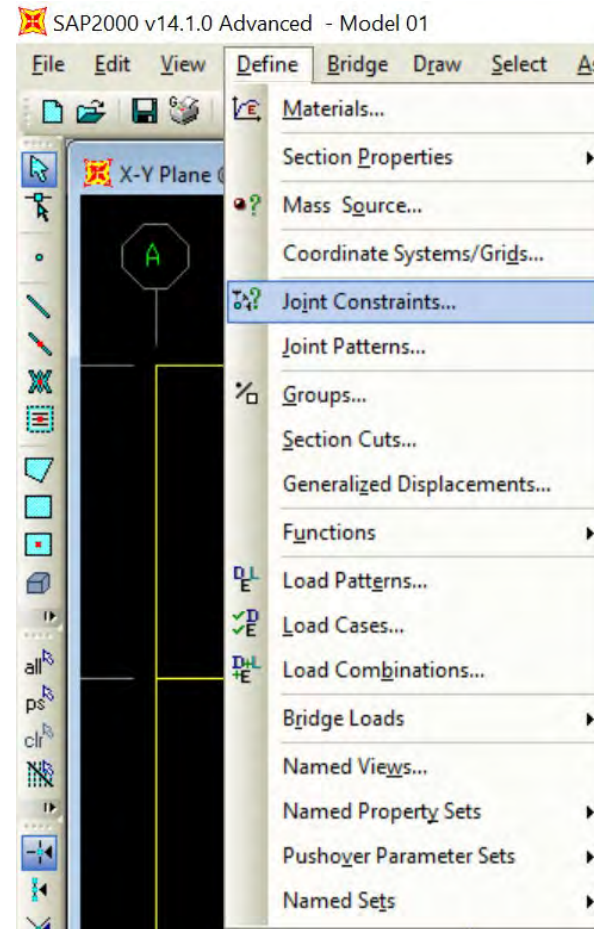
Diafragma pada setiap lantai bangunan, program ETABS

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Diafragma pada program SAP



Select semua area and balok pada suatu lantai



Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

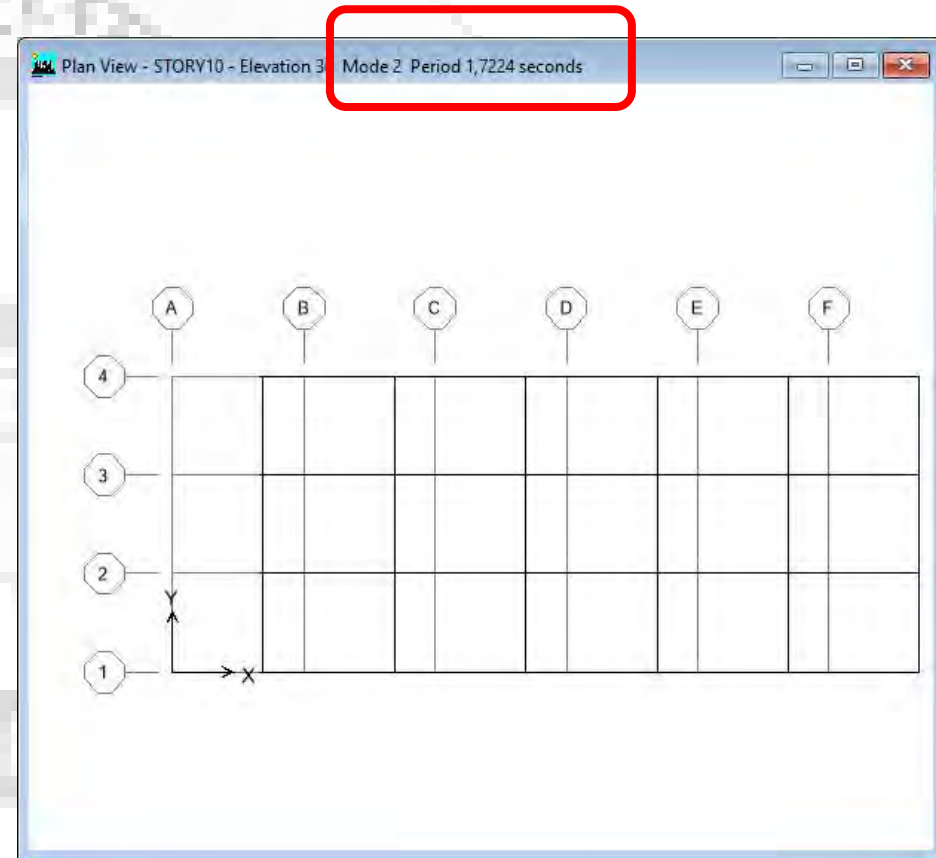
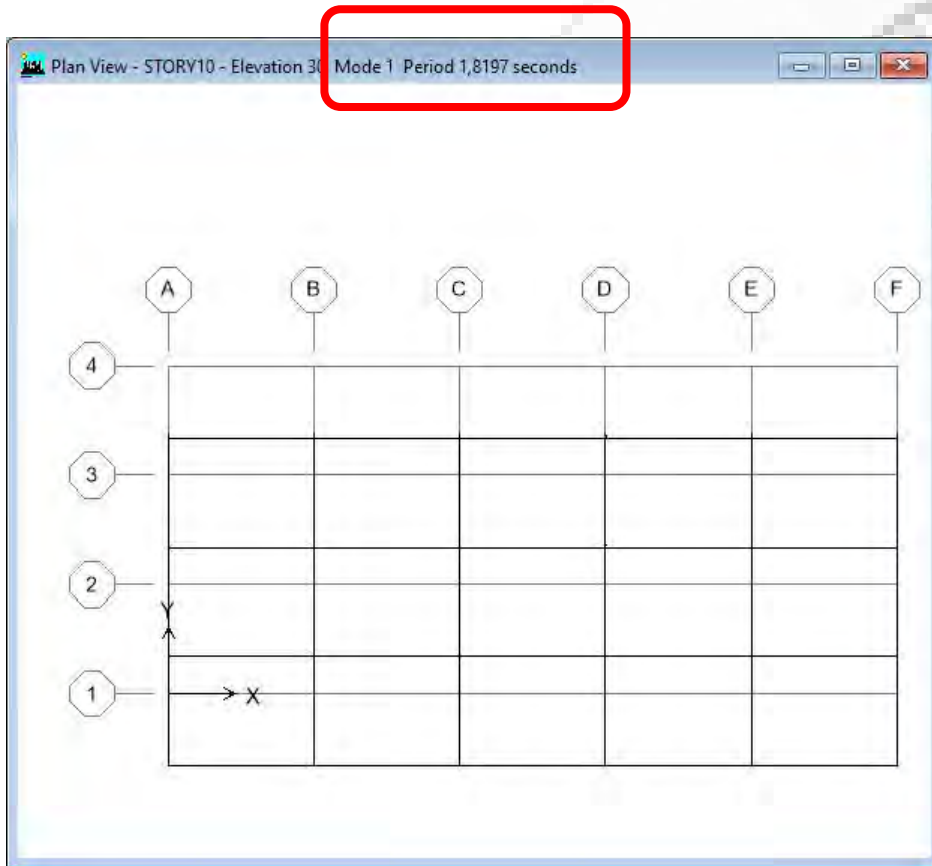
Dari *output* program ETABS atau SAP, diperoleh periode bangunan gedung:

T_1 (mode ke-1, gerakan bangunan gedung searah sumbu y atau Utara-Selatan) = 1,8197 detik

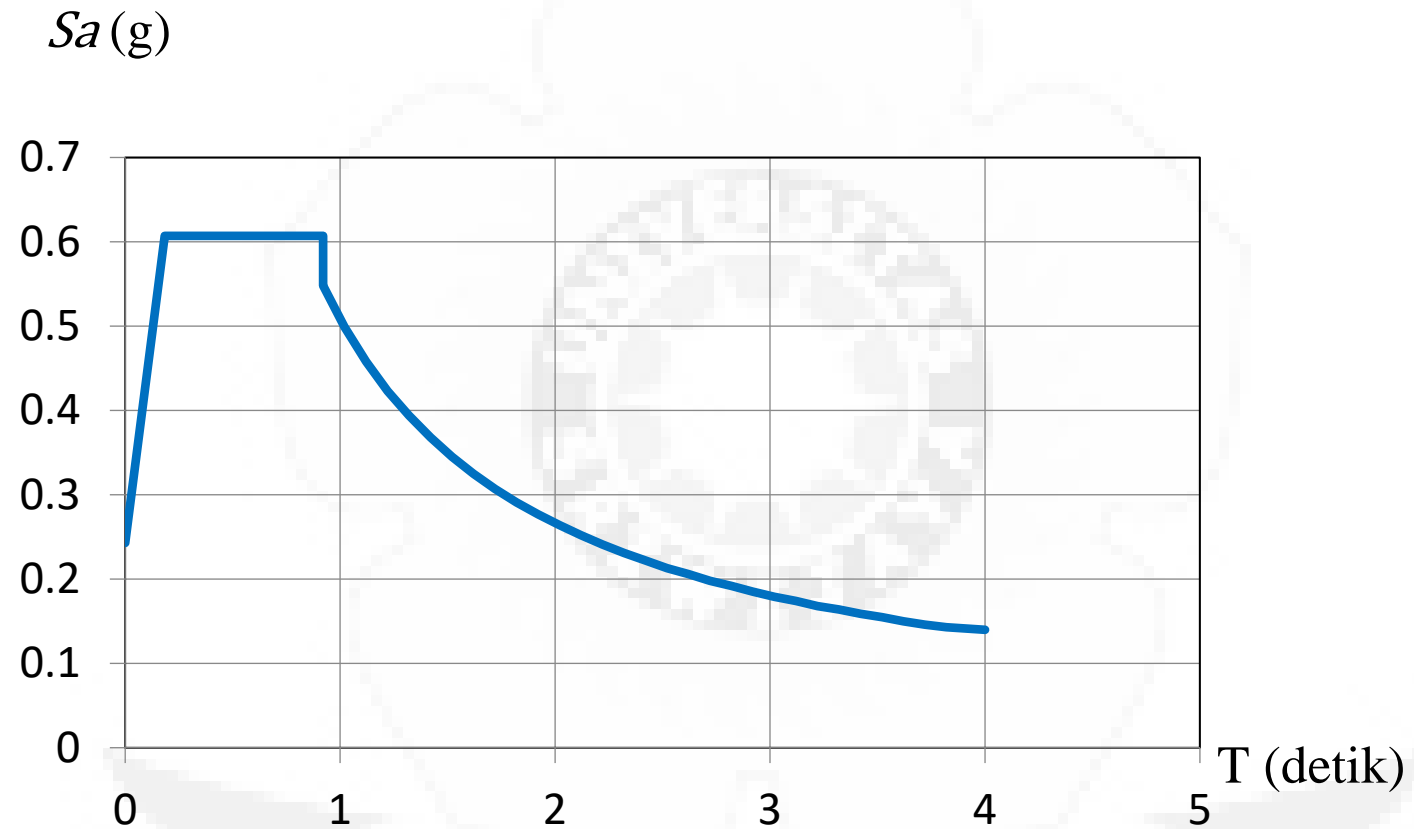
T_2 (mode ke-2, gerakan bangunan gedung searah sumbu x atau Barat-Timur) = 1,7224 detik



Utara



Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method



Respons spektra di suatu kota, jenis tanah lunak (E).
Dari program di-copy paste ke excel.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Koefisien kegempaan di suatu kota, jenis tanah lunak (E):

Percepatan tanah puncak, <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA):	PGA (g)	=	0,361
Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada perioda pendek, redaman 5 persen:	S_s (g)	=	0,686
Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada perioda 1 detik, redaman 5 persen:	S_1 (g)	=	0,3
Nilai terpeta koefisien risiko spesifik situs pada perioda pendek:	C_{RS}	=	0,995
Nilai terpeta koefisien risiko spesifik situs pada perioda 1 detik:	C_{R1}	=	0,939
Koefisien situs untuk PGA:	F_{PGA}	=	1,018
Koefisien situs untuk perioda pendek (pada perioda 0,2 detik):	F_A	=	1,329
Koefisien situs untuk perioda panjang (pada perioda 1 detik):	F_V	=	2,802
Percepatan spektra puncak, <i>Peak Spectra Acceleration</i> (PSA):	PSA (g)	=	0,367
Parameter percepatan respons spektral MCE pada perioda pendek yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs:	S_{MS} (g)	=	0,911
Percepatan percepatan respons spektral MCE pada perioda 1 detik yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs:	S_{M1} (g)	=	0,839
Parameter percepatan respons spektral pada perioda pendek, redaman 5 persen:	S_{DS} (g)	=	0,607
Parameter percepatan respons spektral pada perioda 1 detik, redaman 5 persen:	S_{D1} (g)	=	0,56
$0,2 S_{D1}/S_{DS}$	T_0 (detik)	=	0,184
S_{D1}/S_{DS}	T_s' (detik)	=	0,921

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

7.8.3 Distribusi vertikal gaya seismik

Gaya seismik lateral, F_x , (kN) di sebarang tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$F_x = C_{vx} V \quad (40)$$

dan

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (41)$$

Keterangan:

- C_{vx} = faktor distribusi vertikal
- V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)
- w_i dan w_x = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
- h_i dan h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
- k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut:
 - untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k = 1$
 - untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, $k = 2$
 - untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

Dari SNI 1726:2019
Pasal 7.8.3

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

7.8.4 Distribusi horizontal gaya seismik

Geser tingkat desain seismik di semua tingkat, V_x (kN), harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (42)$$

Keterangan:

F_i adalah bagian dari geser dasar seismik (V) pada tingkat ke- i (kN)

Geser tingkat desain seismik, V_x (kN), harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem pemikul gaya seismik di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen pemikul vertikal dan diafragma.

Dari SNI 1726:2019 Pasal 7.8.4

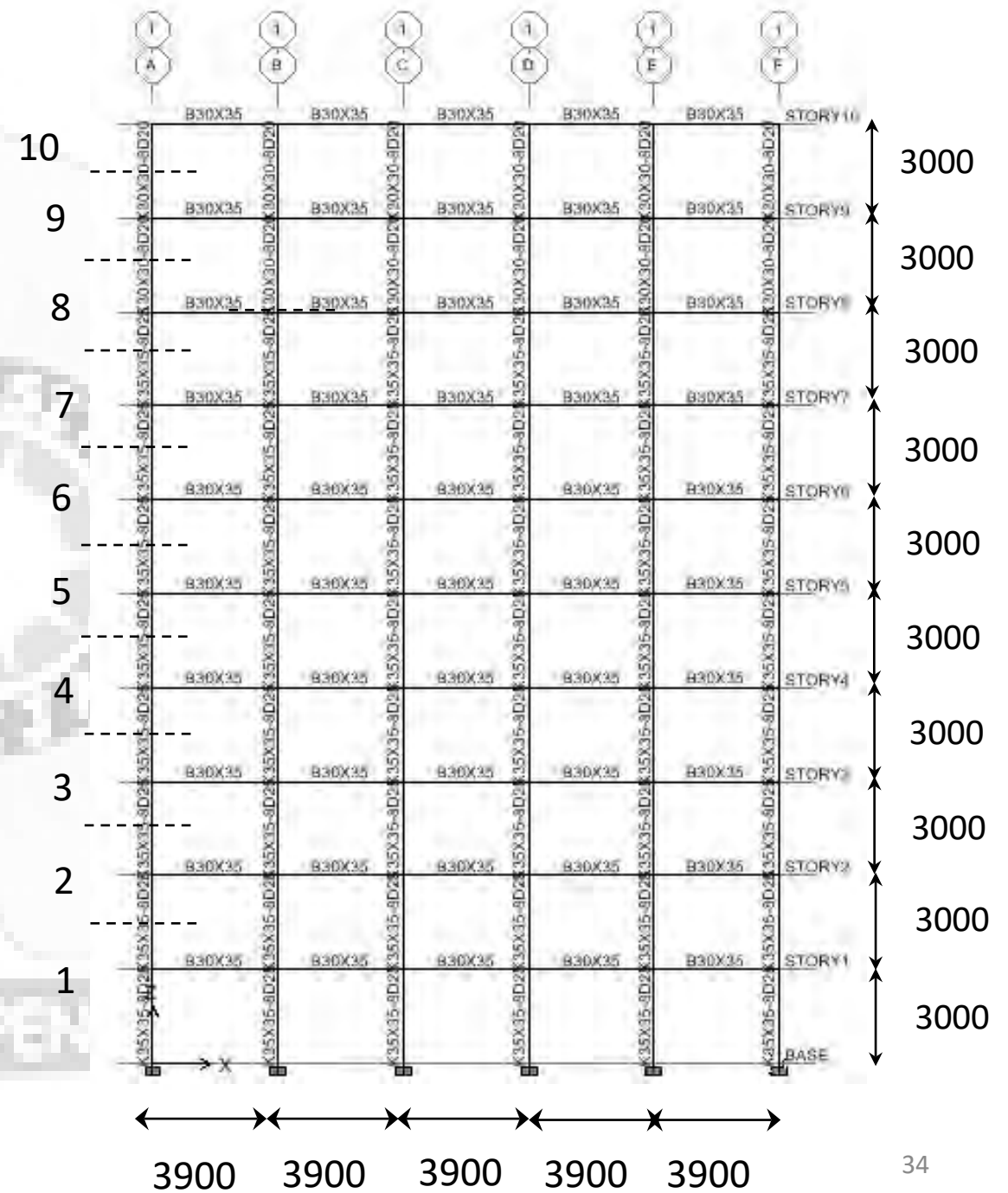
Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Pembagian tinggi *story* (tingkat) untuk perhitungan massa struktur.

Lantai 10: **0,5** tinggi tingkat

Lantai 2-9: 1 tinggi tingkat

Lantai 1: **1,5** tinggi tingkat



Linear Static Analysis atau *Equivalent Static Method*

Perhitungan beban pada bangunan:

- ❖ Beban *Super Imposed Dead Load* (SIDL) pada pelat:
 - Partisi dan atap = 49 kg/m^2
 - Plafond dan Mechanical Electrical (ME) = 74 kg/m^2
 - Dinding = 49 kg/m^2
 - Total = $172 \text{ kg/m}^2 = 1,72 \text{ kN/m}^2$
- Luas pelat = $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$
- Beban *Super Imposed Dead Load* (SIDL) pada satu pelat = $1,72 \times 12 = 20,64 \text{ kN}$
- ❖ Beban hidup pada pelat: $q_{LL} = 250 \text{ kg/m}^2$ (kantor)
- Luas pelat = $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$
- 0,30 Beban hidup pada pelat: $0,3 \times 250 \times 12 = 750 \text{ kg} = 9 \text{ kN}$

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Pada arah Utara-Selatan (U-S):

$I = 1$ (Tabel 4, SNI 1726:2019)

$R = 8$ (Tabel 12, SNI 1726:2019; Rangka beton bertulang pemikul momen khusus)

$S_{D1} = 0,56 g$ (di suatu kota, tanah lunak)

$S_{DS} = 0,607 g$ (di suatu kota, tanah lunak)

$T = 1,8197$ detik (mode ke-1 *output* program ETABS)

$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0,923$ detik

Dari SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1:

Untuk $T \leq T_s$: $C_s \text{ maksimal} = \frac{S_{DS}}{R/I} = 0,07588 g$

Untuk $T \geq T_s$: $C_s \text{ maksimal} = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = 0,0385 g$

Karena $T \geq T_s$, maka $C_s \text{ maksimal} = 0,0385 g$

$C_s \text{ minimum} = 0,044 S_{DS} I \geq 0,01 g$
 $= 0,02671 g \geq 0,01 g$ (terpenuhi)

$$C_s = \frac{S_{DS}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = 0,0417 g$$

$C_s \text{ maksimal} = 0,0385 g < 0,0417 g$, maka ambil nilai C_s arah Utara-Selatan: $C_{U-S} = 0,0385 g$

$W_t = 15.964,56$ kN (Tabel 2. Distribusi Vertikal Gaya Gempa arah U-S)

$$V = C_{U-S} W_t = 614,12 \text{ kN}$$

Dari SNI 1726:2019 Pasal 7.8.3:

p. 49

Untuk menghitung $W h^k$:

$T \leq 0,5$ detik, nilai $k = 1$

$T \geq 2,5$ detik, nilai $k = 2$

maka untuk $T = 1,8197$ detik, diperoleh dari interpolasi nilai $k = 1,660$ untuk perhitungan pada Tabel 2 di halaman berikut.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Pada arah Barat-Timur (B-T):

$I = 1$ (Tabel 4, SNI 1726:2019)

$R = 8$ (Tabel 12, SNI 1726:2019; Rangka beton bertulang pemikul momen khusus)

$S_{D1} = 0,56 g$ (di suatu kota, tanah lunak)

$S_{DS} = 0,607 g$ (di suatu kota, tanah lunak)

$T = 1,7224$ detik (mode ke-2 output program ETABS)

$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0,923$ detik

Dari SNI SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1:

Untuk $T \leq T_s$: $C_s \text{ maksimal} = \frac{S_{DS}}{R/I} = 0,07588 g$

Untuk $T \geq T_s$: $C_s \text{ maksimal} = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = 0,0406 g$

Karena $T \geq T_s$, maka $C_s \text{ maksimal} = 0,0406 g$

$C_s \text{ minimum} = 0,044 S_{DS} I \geq 0,01 g$
 $= 0,02671 g \geq 0,01 g$ (terpenuhi)

$$C_s = \frac{S_{DS}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = 0,0441 g$$

$C_s \text{ maksimal} = 0,0406 g < 0,0441 g$, maka ambil nilai C_s arah Barat-Timur: $C_{B-T} = 0,0406 g$

$W_t = 15.964,56$ kN (Tabel 3. Distribusi Vertikal Gaya Gempa arah B-T)

$$V = C_{B-T} W_t = 648,82 \text{ kN}$$

Dari SNI 1726:2019 Pasal 7.8.3:

Pada arah B-T:

Untuk menghitung $W h^k$:

$T \leq 0,5$ detik, nilai $k = 1$

$T \geq 2,5$ detik, nilai $k = 2$

maka untuk $T = 1,7224$ detik, diperoleh dari interpolasi nilai $k = 1,611$ untuk perhitungan pada Tabel 3 di halaman berikut.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Tabel 1. Perhitungan massa dan beban setiap lantai

Lantai	Lantai			L balok = 4 m			L balok = 3 m			Luas pelat = 3 x 4 m ²			SIDL pada pelat (kN)	0,30 LL pada pelat (kN)	Massa dan beban per lantai W (kN)
	Jenis kolom	Massa (kN)	Jumlah	Jenis Balok	Massa (kN)	Jumlah	Jenis Balok	Massa (kN)	Jumlah	Jenis Pelat	Massa (kN)	Jumlah			
10	30 x 30	3,24	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.470,96
9	30 x 30	6,48	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.548,72
8	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
7	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
6	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
5	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
4	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
3	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
2	35 x 35	8,82	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.604,88
1	35 x 35	13,23	24	30 x 40	11,52	20	25 x 35	6,3	18	T 140	40,32	15	20,64	9	1.710,72
Massa dan beban per lantai = (massa kolom x jumlah) + (massa balok _{30 x 40} x jumlah) + (massa balok _{25 x 35} x jumlah) + (massa pelat x jumlah) + (SIDL pelat x jumlah) + (0,30 LL x jumlah)															15.964,56

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Tabel 2. Distribusi Vertikal Gaya Gempa dan Distribusi Horizontal Gaya Gempa Arah U-S (sumbu Y)

Lantai	W (kN)	h (m)	W h ^k (kN m)	C _{vx} = Wh ^k /(∑Wh ^k) (kN)	F = C _{vx} V (kN)	Storyshear = komulatif F (kN)
10	1.470,96	30,0	416.294,41	0,22	135,25	135,25
9	1.548,72	27,0	367.978,17	0,19	119,55	254,80
8	1.604,88	24,0	313.607,32	0,17	101,89	356,69
7	1.604,88	21,0	251.262,84	0,13	81,63	438,32
6	1.604,88	18,0	194.538,98	0,10	63,20	501,53
5	1.604,88	15,0	143.740,00	0,08	46,70	548,23
4	1.604,88	12,0	99.247,95	0,05	32,24	580,47
3	1.604,88	9,0	61.566,15	0,03	20,00	600,48
2	1.604,88	6,0	31.409,20	0,02	10,20	610,68
1	1.710,72	3,0	10.595,68	0,01	3,44	614,12
Total:	15.964,56		1.890.240,70	1,00		

W_t

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \text{ atau } V_x = C_{U-S} W_t$$

Keterangan:

W: massa bangunan termasuk SIDL dan 0,3 LL

h: komulatif tinggi lantai bangunan

Input beban gempa pada program ETABS

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Tabel 3. Distribusi Vertikal Gaya Gempa dan Distribusi Horizontal Gaya Gempa Arah B-T (sumbu X)

Lantai	W	h	W h ^k	C _{vx} = Wh ^k /(∑Wh ^k)	F = C _{vx} V	Storyshear = komulatif F
	(kN)	(m)	(kN m)	(kN)	(kN)	(kN)
10	1.470,96	30,0	352.808,17	0,22	140,54	140,54
9	1.548,72	27,0	313.462,94	0,19	124,87	265,41
8	1.604,88	24,0	268.682,21	0,16	107,03	372,44
7	1.604,88	21,0	216.671,75	0,13	86,31	458,75
6	1.604,88	18,0	169.019,82	0,10	67,33	526,08
5	1.604,88	15,0	125.997,17	0,08	50,19	576,27
4	1.604,88	12,0	87.946,67	0,05	35,03	611,31
3	1.604,88	9,0	55.324,58	0,03	22,04	633,35
2	1.604,88	6,0	28.787,23	0,02	11,47	644,81
1	1.710,72	3,0	10.044,23	0,01	4,00	648,82
Total:	15.964,56		1.628.744,76	1,00		

W_t

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \text{ atau } V_x = C_{B-T} W_t$$

Keterangan:

W: massa bangunan termasuk SIDL dan 0,3 LL

h: komulatif tinggi lantai bangunan

Input beban gempa pada program ETABS

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Input gaya gempa Fx dan Fy dalam program **ETABS**

Define Static Load Case Names

Load	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load
FYSTATIK	QUAKE	0	User Loads
DEAD	DEAD	1	
LIVE	LIVE	0	
FXSTATIK	QUAKE	0	User Loads
FYSTATIK	QUAKE	0	User Loads

Click To:

Add New Load

Modify Load

Modify Lateral Load...

Delete Load

OK

Cancel

Input gaya gempa Fx dan Fy dalam program **SAP**

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
DEAD	DEAD	1	
DEAD	DEAD	1	
LIVE	LIVE	0	
FX STATIK	QUAKE	0	User Loads
FY STATIK	QUAKE	0	User Loads

Click To:

Add New Load Pattern

Modify Load Pattern

Modify Lateral Load Pattern

Delete Load Pattern

Show Load Pattern Notes...

OK

Cancel

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Dalam program ETABS

Input Fx pada diafragma setiap lantai (*story*)
Arah Barat-Timur

Input Fy pada diafragma setiap lantai (*story*)
Arah Utara-Selatan

User Seismic Loading

Edit

User Seismic Loads on Diaphragms

Story	Diaphragm	FX	FY	MZ
STORY10	D10	140,54	0,	0,
STORY9	D9	124,87	0,	0,
STORY8	D8	107,03	0,	0,
STORY7	D7	86,31	0,	0,
STORY6	D6	67,33	0,	0,
STORY5	D5	50,19	0,	0,
STORY4	D4	35,03	0,	0,
STORY3	D3	22,04	0,	0,
STORY2	D2	11,47	0,	0,
STORY1	D1	4,00	0,	0,

User Specified Application Point

Apply at Center of Mass

Additional Ecc. Ratio (all Diaph.)

OK Cancel

User Seismic Loading

Edit

User Seismic Loads on Diaphragms

Story	Diaphragm	FX	FY	MZ
STORY10	D10	0,	135,25	0,
STORY9	D9	0,	119,55	0,
STORY8	D8	0,	101,89	0,
STORY7	D7	0,	81,63	0,
STORY6	D6	0,	63,20	0,
STORY5	D5	0,	46,70	0,
STORY4	D4	0,	32,24	0,
STORY3	D3	0,	20,00	0,
STORY2	D2	0,	10,20	0,
STORY1	D1	0,	3,44	0,

User Specified Application Point

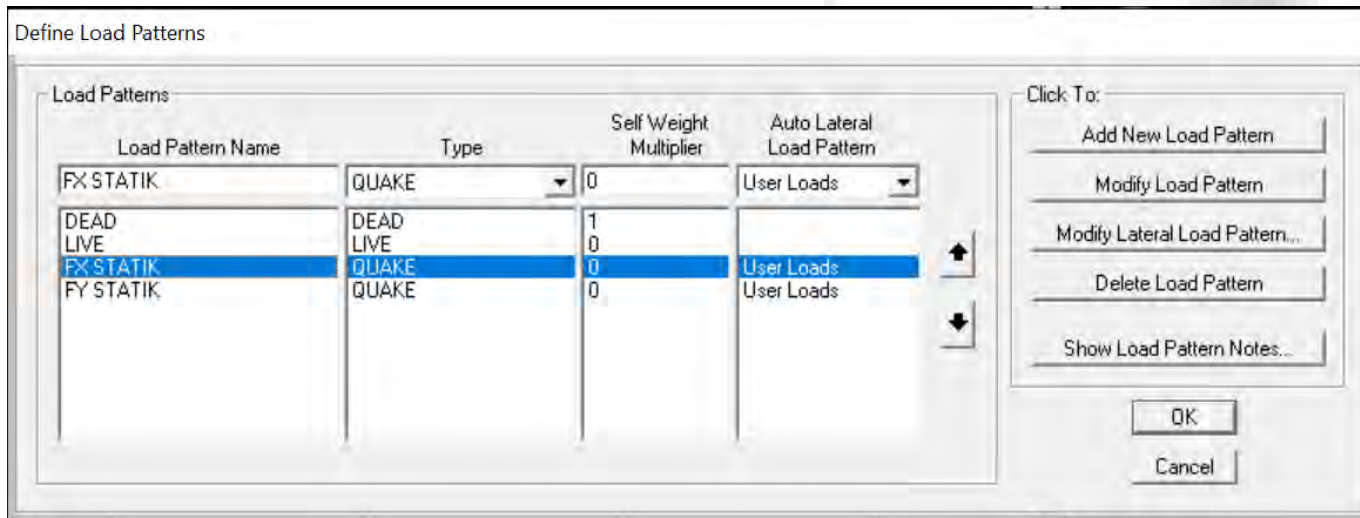
Apply at Center of Mass

Additional Ecc. Ratio (all Diaph.)

OK Cancel

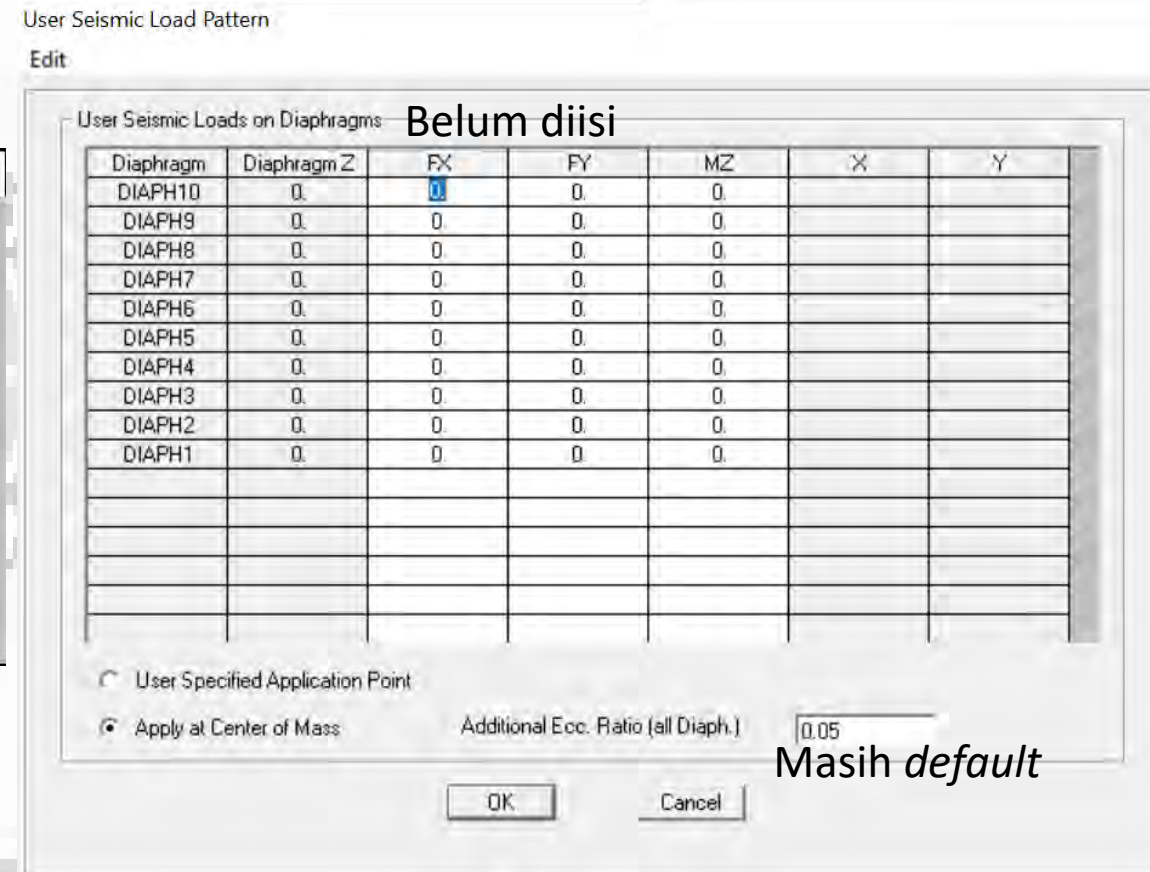
Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Input Fx dan Fy dalam program SAP



Klik Modify Lateral Load Pattern

Untuk FX Statik, isi nilai beban FX yang telah diperoleh dari perhitungan Tabel 3.
Untuk FY Statik, isi nilai beban FY yang telah diperoleh dari perhitungan Tabel 2.



Masih default

Linear Static Analysis atau *Equivalent Static Method*

Pemberian Beban (F) pada model bangunan

Nilai F pada Tabel 2 dan 3 adalah beban gempa di arah horisontal (Q_h).

Beban gempa di arah horisontal (E_h)

Redundansi:

- $\rho = 1,3$ (tanak lunak, desain seismik E, SNI 1726:2019 pasal 7.4.2.1)
- Q_E (pengaruh gaya sesimik horisontal dari V_{base}) = F dari Tabel 2 dan 3.
- $E_h = \rho Q_E = 1,3 \times F$

Beban gempa di arah vertikal (E_v)

- $E_v = 0,2 S_{DS} (DL + SIDL) = 0,2 (0,607) (DL + SIDL) = 0,1214 (DL + SIDL) = 0,1214 DL^*$

Kombinasi pembebanan adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4.

Pilih gaya dalam *ultimate* momen, geser, dan aksial terbesar pada balok dan kolom untuk mendesain penulangan.

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

Tabel 4. Kombinasi Pembebanan

No.	DL		LL			Eh		Ev				Eh		Ev		
1	1,4															
2	1,2	+	1,6													
3	1,2	+	1	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	
4	1,2	+	1	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	
5	1,2	+	1	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	
6	1,2	+	1	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	
7	1,2	+	1	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	
8	1,2	+	1	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	
9	1,2	+	1	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	
10	1,2	+	1	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	
11	0,9			+	0,3	(1,3	+	0,03642	DL*)	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	
12	0,9			-	0,3	(1,3	-	0,03642	DL*)	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	
13	0,9			+	0,3	(1,3	+	0,03642	DL*)	-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	
14	0,9			-	0,3	(1,3	-	0,03642	DL*)	+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	
15	0,9			+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	
16	0,9			-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	
17	0,9			+	1	(1,3	+	0,1214	DL*)	-	0,3	(1,3	-	0,1214	DL*)	
18	0,9			-	1	(1,3	-	0,1214	DL*)	+	0,3	(1,3	+	0,1214	DL*)	

Catatan: DL* = DL + SIDL

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

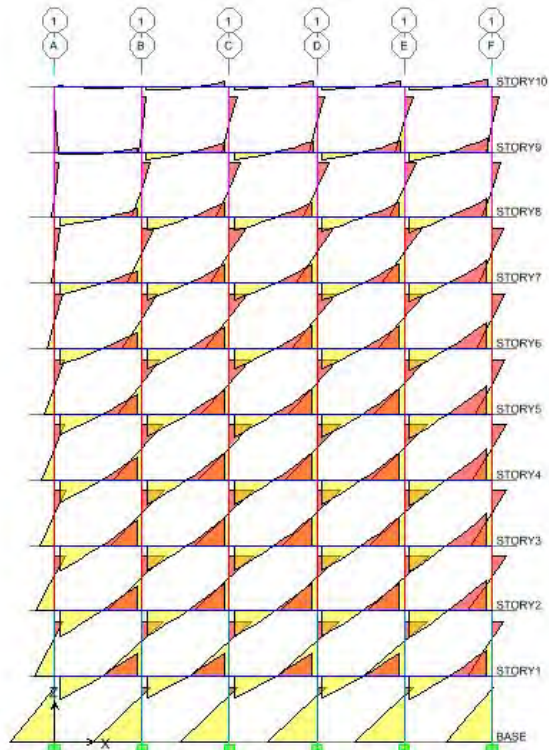


Diagram Momen

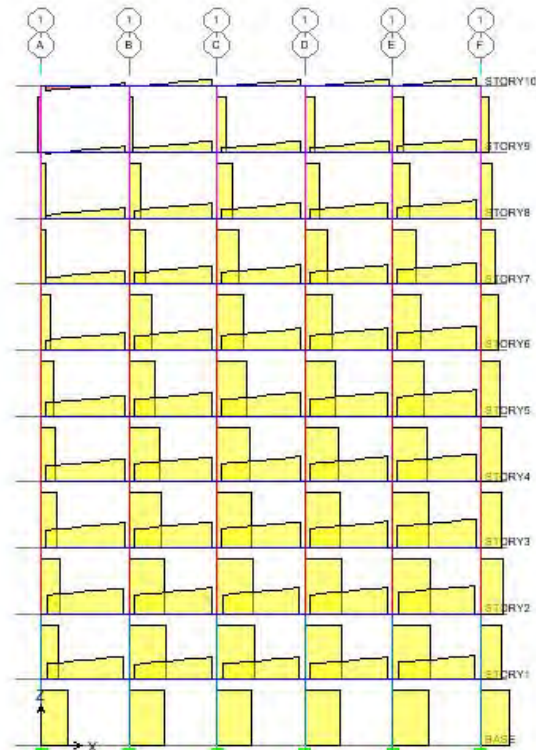


Diagram Gaya Geser

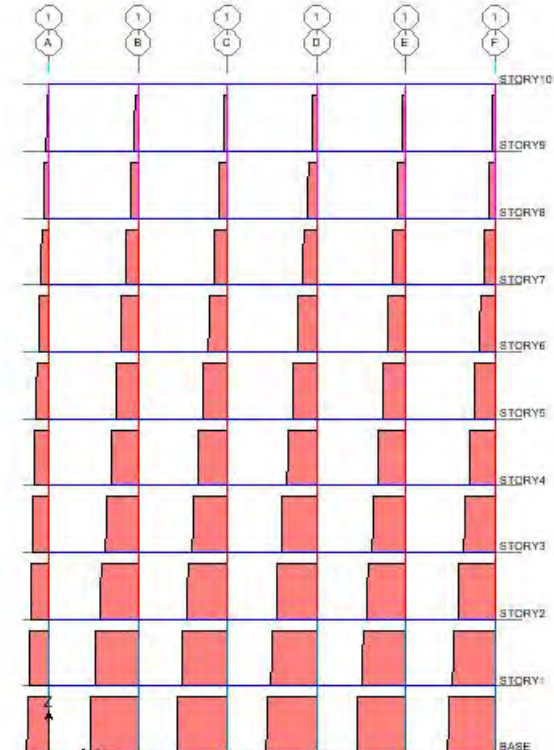
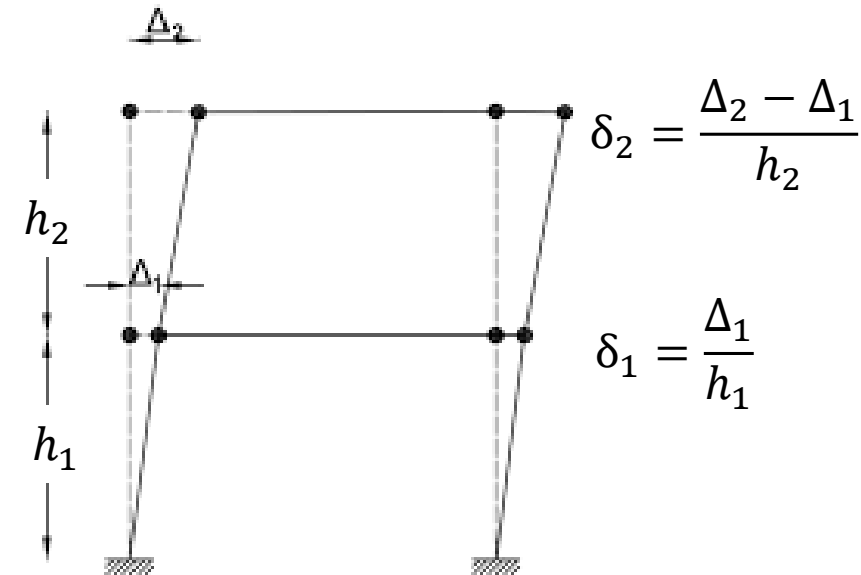


Diagram Gaya Aksial

Linear Static Analysis atau Equivalent Static Method

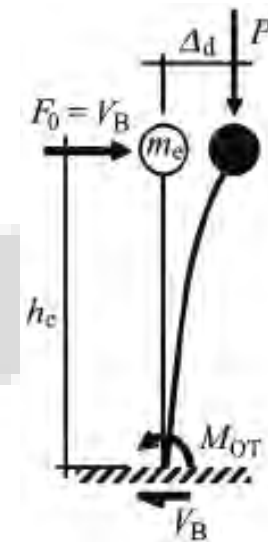
Story Drift (Simpangan Tingkat)

- **Story drift** (δ) adalah ukuran dari seberapa jauh suatu lantai atau atap yang **berpindah** (Δ) akibat gaya lateral relatif terhadap **tingkat lantai** (H) tepat di bawahnya.
- **Story drift** (δ) adalah **rasio perbedaan defleksi** (Δ) antara dua lantai yang berdekatan **dibagi dengan ketinggian tingkat** (H) yang memisahkan kedua lantai tersebut.



Overturning Moment

- Terdapat kecenderungan **momen** yang diakibatkan oleh **gaya statik ekuivalen** yang bekerja di atas dasar bangunan untuk membalik (**overturning**) struktur.
- **Beban mati bangunan cukup untuk menahan gaya overturning**, tetapi kekuatan struktur harus selalu dianalisis.



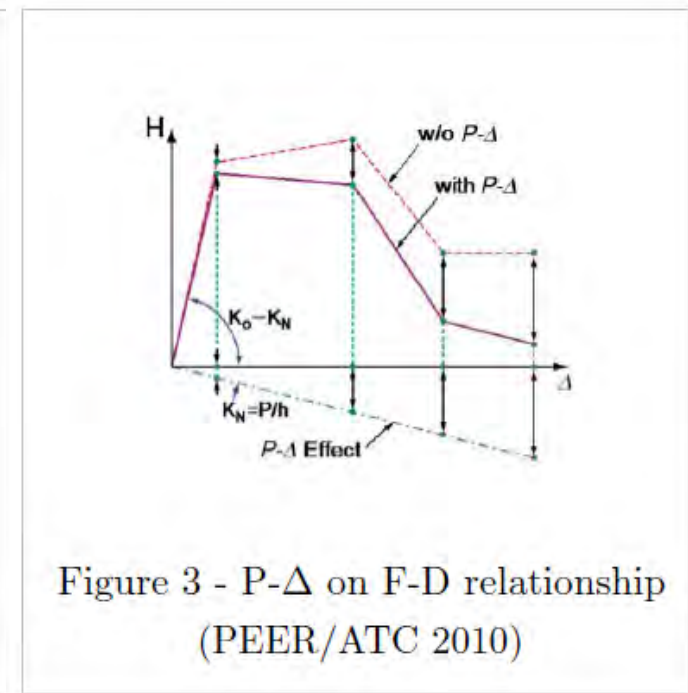
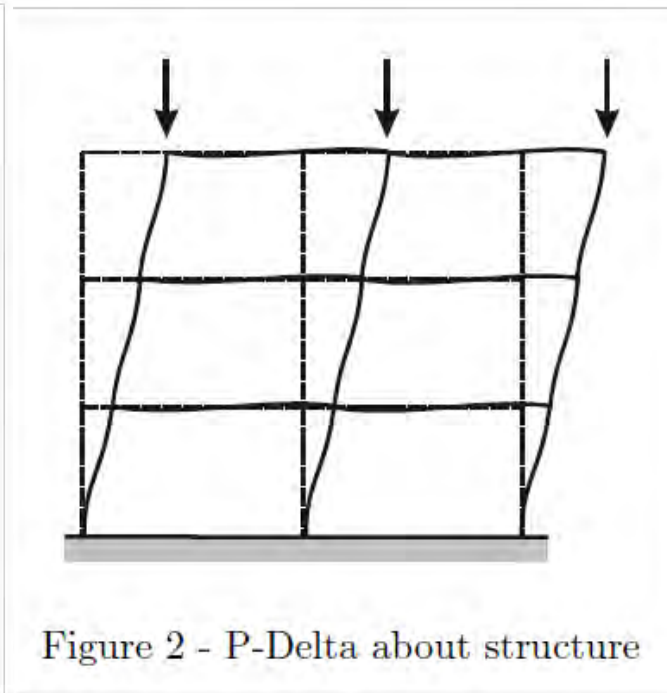
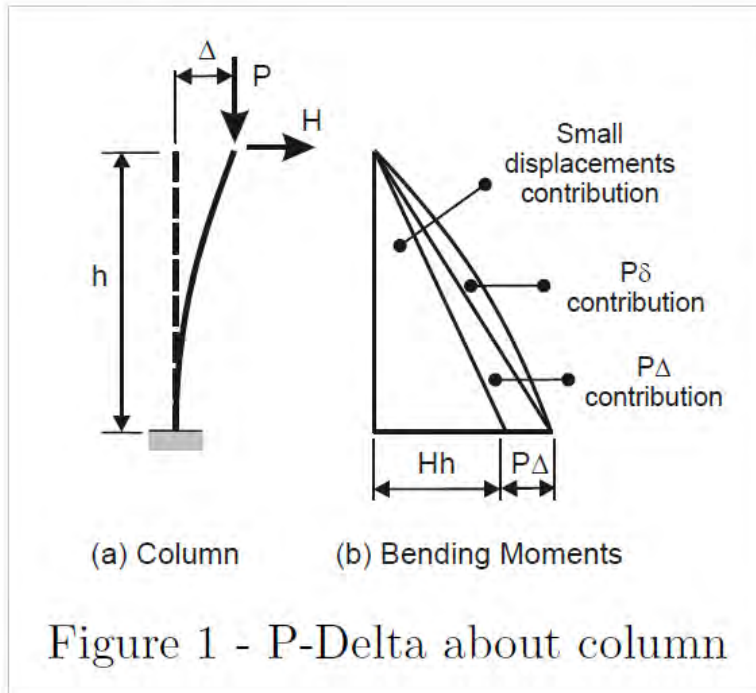
P-Delta Effect

P-Delta effect merupakan **pengaruh geometrik** terhadap respons struktur akibat gaya normal tekan.

P-Delta effect terjadi karena adanya **beban gravitasi pada struktur bangunan bertingkat yang titik tangkap gravitasinya berpindah secara lateral** [Fig. 1 (a)].

Kondisi ini **memperbesar story drift**, momen guling, dan perilaku mekanis tertentu, serta **mengurangi kapasitas deformasi** [Fig. 1 (b)].

P-Delta pada struktur (Fig. 2), dan P- Δ pada peraturan ATC 2010 (Fig. 3):



P-Delta Effect

- **P- δ effect** atau P-"*small-delta*" diakibatkan oleh **deformasi lokal relatif** di antara titik-titik pertemuan elemen struktur. Biasanya, P- δ hanya menjadi signifikan pada nilai perpindahan besar, atau terutama pada **kolom langsing**. Selama struktur mematuhi persyaratan kelangsingan yang berkaitan dengan rekayasa gempa, tidak disarankan untuk memodelkan P- δ , karena hal tersebut dapat secara signifikan meningkatkan waktu perhitungan tanpa memberikan manfaat informasi yang berguna. Cara yang lebih mudah untuk menganalisis perilaku ini adalah dengan membagi elemen-elemen struktur menjadi beberapa segmen, kemudian mentransfer perilaku menjadi efek P- Δ (Powell, 2006).
- **P- Δ effect** atau P-"*big-delta*" diakibatkan oleh perpindahan relatif di antara titik-titik pertemuan elemen struktur. Tidak seperti P- δ , jenis *P- Δ effect* sangat penting untuk pemodelan dan analisis nonlinier. Sebagaimana ditunjukkan dalam Fig. 2, **pembebanan gravitasi akan mempengaruhi respon struktural di bawah perpindahan lateral yang signifikan**. P- Δ dapat berkontribusi terhadap **hilangnya resistensi lateral, meningkatkan deformasi residual, dan ketidakstabilan dinamis** (Deierlein et al., 2010). Seperti yang ditunjukkan pada Fig. 3, kekakuan lateral efektif menurun, mengurangi kapasitas kekuatan di semua fase hubungan gaya-deformasi (PEER/ATC 2010). **Untuk mempertimbangkan efek P- Δ secara langsung, beban gravitasi harus ada selama analisis nonlinier**. Aplikasi P- Δ effect pada *input* program hanya menyebabkan peningkatan minimal waktu perhitungan, dan akan tetap akurat untuk tingkat *drift* hingga 10% (Powell, 2006).

Sumber: <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect>

P-Delta Effect

P-delta effect harus diperhitungkan jika:

- struktur gedung mempunyai tinggi dari lokasi jepit lateral ≥ 40 meter atau ≥ 10 lantai
- *Inter-story drift*: $\Delta > 0,03 \frac{h}{R}$

dengan:

h : tinggi antar lantai (m)

R : faktor reduksi gempa kuat akibat beban gempa V saja.



Referensi

- American Society of Civil Engineers (ASCE), (2000): *Federal Emergency Management Agency (FEMA) 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA, Washington, D.C.
- Applied Technology Council (ATC), (1996): *ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volume 1, ATC, Sacramento, CA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2019): *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Budiono, B dan Supriatna, L., (2011): *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa*, Penerbit ITB, Bandung.
- Chopra, A.K., (1995): *Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New-Jersey.
- Nurjannah, S.A., (2016): *Perilaku Histeretik Sub-assembly Balok-Kolom Reactive Powder Concrete Pra-tegang Parsial*, *Disertasi*, Program Pasca Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>
- https://drive.google.com/drive/folders/1Cuexl2uu2Xqz0nLHTYXIBx91M_CNhZ9m