

# PERILAKU DINAMIK STRUKTUR 2 DIMENSI DENGAN TIPE KOLOM PENDEK TERHADAP BEBAN SIKLIK DAN DINAMIK

Talitha Zhafira<sup>1</sup>, Priyosulistyo<sup>2</sup>, Iman Satyarno<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Semarang, <sup>2,3</sup> Prodi Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

<sup>1</sup> [thalita@usm.ac.id](mailto:thalita@usm.ac.id), <sup>2</sup> [priyo\\_ugm@ugm.ac.id](mailto:priyo_ugm@ugm.ac.id), <sup>3</sup> [imansatyarno@ugm.ac.id](mailto:imansatyarno@ugm.ac.id)

## ABSTRAK

Wilayah Indonesia terletak di antara tiga lempeng tektonik, Pasifik, Indo-Australia dan Eurasia. Kondisi tersebut membawa Indonesia ke daerah-daerah yang rawan bahaya gempa. Akibatnya, sebagian besar struktur bangunan sederhana rentan terhadap kerusakan karena pekerjaan konstruksi yang tidak tepat. Dalam penelitian ini, struktur 2D dengan jenis kolom pendek dibuat dan diuji di bawah beban siklik dan dinamis, yang dirujuk ke ACI standar ACI 374.1-05 Tes pada frekuensi alami, perpindahan, pola retak, dan perpindahan lateral dilakukan sampai mendekati zona plastiknya. Tes siklik dilakukan dalam lima langkah, setiap langkah terdiri dari tiga beban siklik. Frekuensi alami mengalami penurunan besar pada drift 0,6% . Perubahan frekuensi alami yang signifikan terjadi pada rasio drift 0,6%. Frekuensi model numerik (SAP 2000) tidak jauh berbeda dari hasil eksperimental. dengan secara bertahap mengubah faktor inertial, tidak jauh berbeda dari hasil eksperimen. Perpindahan maksimum adalah 14,59 mm pada beban lateral maksimum 222 kg. Pola retak diagonal muncul di sendi kolom balok.

**Keywords:** gempa bumi, bangunan sederhana, siklik, perilaku dinamik, kolom pendek

## 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Wilayah Indonesia terletak di antara tiga lempeng bumi yang aktif, yaitu Lempeng Pasifik, Indo-Australia, dan Eurasia. Kondisi tersebut mengakibatkan Indonesia menjadi daerah rawan terhadap bahaya gempa. Tingkat kerusakan struktur akibat gempa bumi antara lain tergantung pada karakteristik dinamik struktur dan kerusakan pada elemen struktur, seperti antara lain kolom. Kolom merupakan elemen penting dari sebuah bangunan, karena kegagalan kolom dapat berakibat keruntuhan bangunan.

Keruntuhan struktur sering disebabkan oleh peristiwa resonansi pada bangunan , yakni apabila frekuensi gempa pada permukaan tanah akibat gempa berdekatan dengan frekuensi alami struktur. Kondisi ini mengakibatkan struktur bangunan rumah tinggal menjadi sangat rentan mengalami kerusakan. Frekuensi alami adalah salah satu parameter dari karakteristik dinamik suatu struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai beban lateral, *displacement*, frekuensi alami, dan pola retak pada pengujian siklik.

### 1.2 Batasan Penelitian

Model portal 2D dalam penelitian ini merupakan *model* dari *prototype* rumah sederhana satu lantai dengan ukuran 4m x 4m dan tinggi 3.2m dari *prototype* rumah sederhana yang diskala 1:4.

Penelitian ini merupakan awal dari penelitian portal 3D yang mempelajari pengaruh beban lateral pada frekuensi alami, dan pola retak menggunakan portal 2D secara eksperimen dan numerik.

## 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 Karakteristik Dinamik

Penilaian untuk mengetahui struktur melalui karakteristik dinamik mikrotremor dan makrotremor dilakukan melalui uji model di laboratorium. Estimasi kerentanan suatu struktur di atas tanah yang bersangkutan ketika terjadi gempa dapat diperkirakan derajat kerusakan strukturnya melalui hubungan percepatan pada tanah dan dan simpangan pada bangunan, Nakamura (2003).

Karakteristik dinamik telah dilakukan oleh (Nakamura, dkk, 2000) untuk mengidentifikasi mekanisme kerusakan dalam evaluasi resiko kerusakan atau keruntuhan pada beberapa titik struktur. Dari analisis spektral hasil rekaman didapatkan frekuensi alami dan percepatan, sehingga faktor amplifikasi dari sebuah struktur dapat diketahui. Percepatan maksimum dan nilai kerentanan didapatkan dalam eksperimen, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai indikator ketahanan bangunan terhadap getaran gempa bumi.

Adapun pengukuran getaran pada struktur dimaksudkan untuk menghitung intensitas maksimum atau amplitude getaran maksimum pada permukaan tanah yang dapat merusakkan bangunan. Hubungan

frekuensi untuk system berderajat tunggal dirumuskan sebagai berikut :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

dengan :

$\omega$  :  $2\pi f$

k : kekauan struktur

m : massa

Menurut Nakamura (2000) simpangan lateral struktur dapat diturunkan dari hasil uji percepatan seperti berikut :

$$\partial j = \frac{\alpha s j}{(2\pi F s)^2} \quad (2)$$

dengan :

Fs : frekuensi

$\alpha j$  : percepatan lateral

$\delta j$  : simpangan lateral

## 2.2. Pembebanan Siklik

Pada struktur kolom, beban aksial merupakan representatif dari berat sendiri dan beban siklik merupakan beban dari luar yang terjadi secara berulang, seperti beban gempa. Beban aksial dan siklik akan bekerja secara bersamaan pada struktur kolom sehingga kegagalan struktur terjadi (Parmo,2014). Pengujian struktur terhadap beban lateral siklik menghasilkan suatu kurva histeritik perilaku struktur terhadap beban siklik.

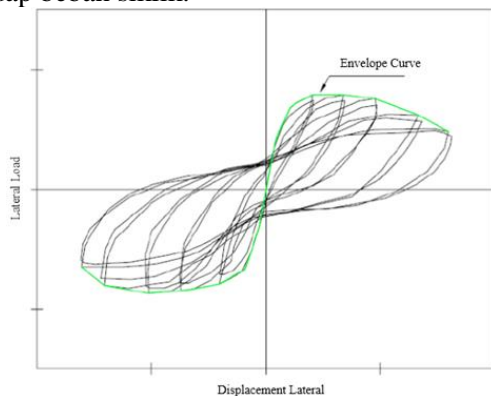


Figure 1. Loop hysteresis type of cyclic load of structure (Sari, 2018).

## 2.3 Teori Model Struktur

Setiap model struktur harus dirancang, dibebani, dan diimplementasikan hasil-hasilnya berdasarkan *similitude requirements* yang memberikan hubungan antara model dan *prototype-nya*.( Suhendro, 2000). Pada pemodelan respon struktur akibat beban gempa , yang dirasakan oleh struktur sebagai getaran arah horisontal dan vertikal dari semua elemen-elemennya

akibat gaya inersia, dapat dimodelkan di laboratorium dengan mengacu pada skala yang tercantum dalam tabel berikut :

Table1. Scale factor for structural response due to earthquake load (Suhendro B, 2000)

		Dimension	Artificial Mass Simulation
Load	Force, Q	F	$S_E/SI^2$
	Pressure, q	$FL^{-2}$	$S_E$
	Acceleration, $\alpha$	$LT^{-2}$	1
	Gravity, g	$LT^{-2}$	1
	Velocity, v	$LT^{-1}$	$SI^{1/2}$
	Time, t	T	$SI^{1/2}$
Geometry	Dimension, l	L	SI
	Displacement, $\delta$	L	SI
	Frequency, $\omega$	$T^{-1}$	$SI^{-1/2}$
Material	Modulus, E	$FL^{-2}$	$S_E$
	Tension, $\sigma$	$FL^{-2}$	$S_E$
	Poisson's ratio, $\nu$	---	1
	Density, $\rho$	$FL^{-4}T^2$	*
	Energy, EN	FL	$S_E SI^3$

\*( $g \rho l/E$ )m = ( $g \rho l/E$ )p

## 3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan benda uji beton bertulang berbentuk portal 2D dengan skala geometri 1 : 4 di laboratorium Universitas Gadjah Mada ukuran 1m x 1m x 0,8m dari ukuran model portal 3D. Dalam penelitian ini, kekakuan balok portal 2D sudah dirancang memiliki kekakuan yang sama dengan kekakuan balok dari portal 3D.

Table 2. Dimension of the test object

No	Dimension (mm)		
	Element	Prototype	Modelling
1	Sloof	250x200	62.5x50
2	Kolom	300x300	75x75
3	Balok	400x200	100x50

Pengujian yang akan dilakukan pada model berupa pengujian dinamik dan siklik. Tujuan pengujian dinamik dilakukan untuk mengetahui frekuensi alami benda uji pada setiap tahap kali diberikan beban siklik.

Dan tujuan dari pengujian beban siklik untuk melihat P maksimal leleh model 2D.

Skala model dirancang menyerupai *prototype* sehingga dapat digunakan untuk memprediksi sifat *prototype* dengan memenuhi syarat persamaan *similaritas* Tabel.3.

Table3. Scale factor for structural response due to earthquake load (Suhendro B, 2000)

		Dimension	Artificial Mass Simulation	Scale Value Model
Load	Force, Q	F	$S_E/S_I^2$	1/16
	Acceleration, $\alpha$	$LT^{-2}$	1	1
Geometry	Dimension, l	L	SI	1/4
	Displacement, $\delta$	L	SI	1/4
	Frequency, $\omega$	$T^{-1}$	$SI^{-1/2}$	2
Material	Modulus, E	$FL^{-2}$	$S_E$	1
	Tension, $\sigma$	$FL^{-2}$	$S_E$	1

Bahan-bahan material yang digunakan untuk membuat benda uji seperti agregat halus digunakan pasir Merapi dalam keadaan SSD, lolos saringan 1/2 cm. Agregat kasar yang digunakan adalah jenis chipping batu andesit dari Clereng, Kulon Progo yang memiliki ukuran 1- 1/2 cm. Semen yang digunakan adalah semen portland Tiga Roda.

Beton yang direncanakan pada penelitian adalah beton normal dengan kuat tekan beton rencana (28 hari)  $f_c' = 18.87$  Mpa serta memiliki nilai slump  $\pm 10$  cm. Material baja tulangan yang dipakai untuk tulangan longitudinal adalah polos P6 mm dan P4 mm sedangkan tulangan transversal (sengkang) menggunakan kawat 3 mm. Pengujian kuat tekan sampel beton silinder dengan ukuran  $D = 75$  mm,  $t = 150$  mm, serta sampel kubus dengan ukuran  $75 \times 75 \times 75$  mm. Pengujian kuat tekan sampel beton dengan mesin UTM. Pengujian non destructive menggunakan UPV juga dilakukan untuk melihat (v) kualitas beton melalui kecepatan rambat gelombang suara ultra menggunakan metode *Direct*

*Transmission*. Pengujian ini dilakukan sebelum uji kuat tekan menggunakan mesin UTM.

Instrumentasi pengujian siklik di laboratorium pada benda uji 2D dipasang LVDT dengan pembacaan maksimal panjang 50 mm untuk memonitor besarnya displacement yang ditinjau selama pengujian berlangsung dan double acting hydraulic jack. LVDT yang digunakan sebanyak satu buah pada posisi join balok-kolom. Instrumentasi pengujian siklik pada Gambar 2.

Alat-alat utama pengujian siklik adalah double acting hydraulic jack, load cell berkapasitas 5 ton, pompa hidrolik, dan satu buah LVDT. Pada pengujian siklik beban aksial yang digunakan sebesar 295,5 kg. Pengujian siklik pada penelitian ini digunakan metode *displacement control*.

Pada pengujian siklik digunakan lima step perulangan. Setiap step terdiri dari tiga siklus. Pola pembebanan mengacu pada Gambar 3. Pengujian akan dihentikan saat terjadi kegagalan specimen pada *drift ratio* 2,5%. Hal ini mengacu berdasarkan peraturan FEMA 389 untuk struktur bangunan yang memenuhi standart life safety yaitu dengan tipe drift ratio sebesar 1-2%. Diharapkan dengan drift ratio 2,5%, struktur tersebut sudah mengalami kegagalan struktur. Pengujian ini hanya akan dilihat P maksimal leleh.

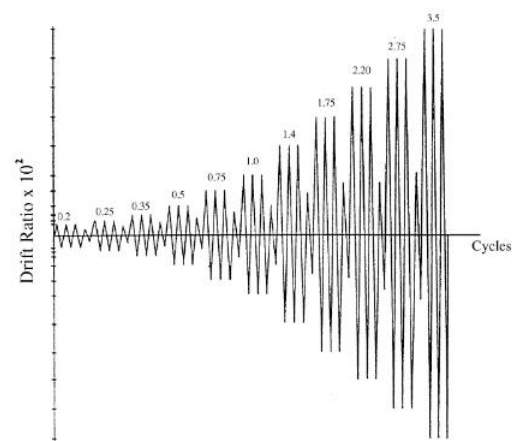


Figure 3. Loading pattern (Riyanto, 2017)

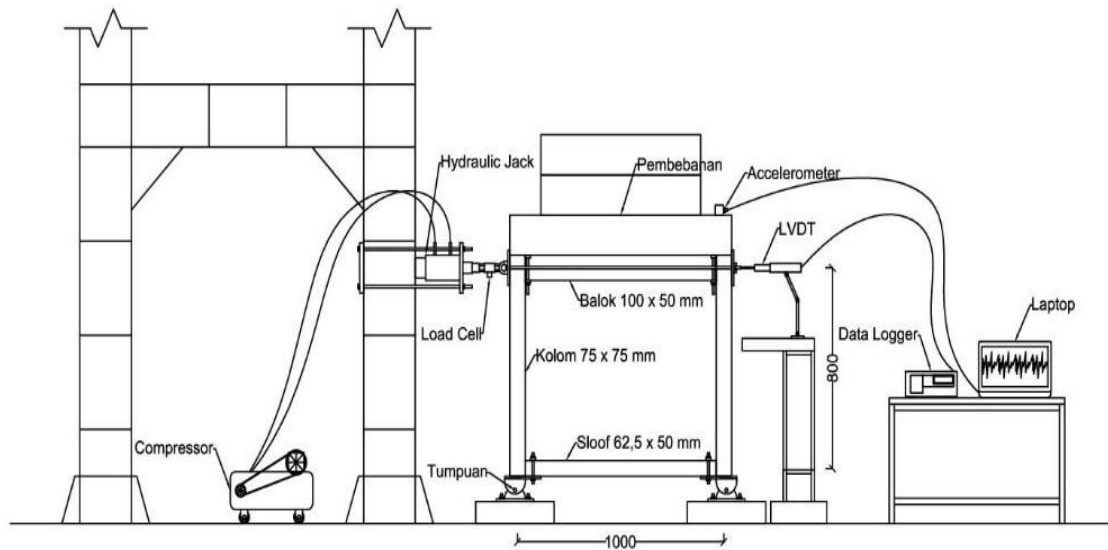


Figure 2. Sketch of the cyclic test

Pengujian dinamik juga dilakukan untuk mengetahui frekuensi alami dan amplitudo benda uji. sensor accelerometer diletakkan pada bagian beban yang terpasang, kemudian di sambungkan pada analog digital converter sebagai penghubung antara sensor penangkap sinyal dan komputer pada software DEWE soft X. Instrumentasi pengujian dinamik dapat dilihat pada Gambar 4.

Langkah pertama pengujian dinamik, dilakukan sebelum dimulainya pengujian beban siklik agar diperoleh data pertama berupa frekuensi alami awal sebelum benda uji mengalami kerusakan. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan pembebanan siklik secara bertahap (Prayuda, 2015). Setelah usai diberikan beban siklik, pengujian dinamik dilakukan kembali. Hal ini diulang dengan langkah yang sama hingga step terakhir.

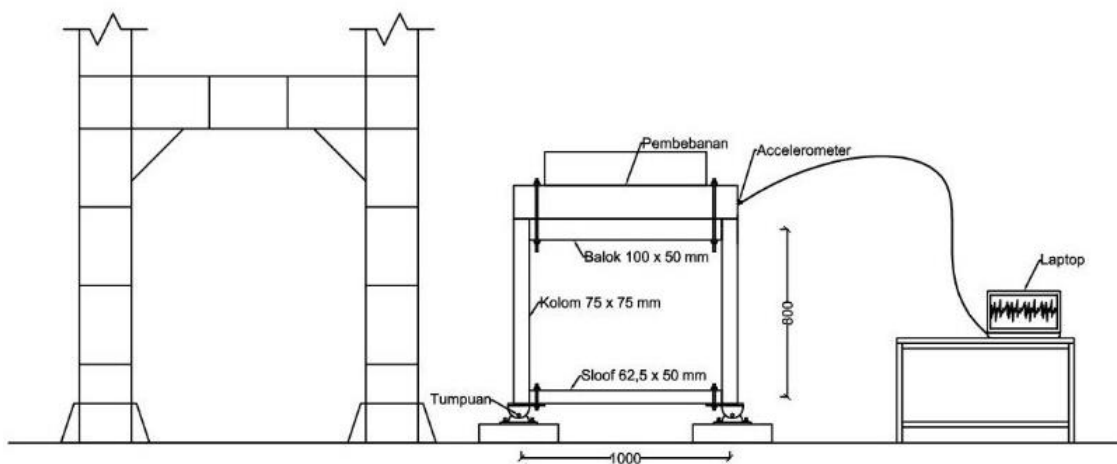


Figure 4. Sketch of the dynamic test

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil pengujian tulangan baja dan kuat tekan beton

Table 4. Steel tensile test results

Steel Material	$f_y$ (Mpa)	$f_u$ (Mpa)
P6	325.46	352.76
P4	557.84	557.84

wire 3mm	395	395
----------	-----	-----

Source : Test result

Pengujian kuat tekan sampel beton dengan mesin UTM dapat dilihat pada Tabel 4. Pengujian (*non destructive*) menggunakan UPV juga dilakukan untuk melihat ( $v$ ) kecepatan rambat gelombang menggunakan metode *Direct Transmission*. Mengacu pada penelitian (Rofa, 2018) dengan judul “Analisis Kekuatan Kolom

*Langsing Terhadap Beban Lateral Pada Rumah Sederhana Dengan Metode Nakamura*” didapat, hubungan antara kecepatan dan kuat tekan beton dapat dilihat hasil pengukuran pada benda uji dalam Tabel 4 dan Tabel 5.

Table 4. Cylinder concrete compressive strength test results (Rofa, 2018)

Sample	UTM test	UPV test
	Cylinder fc' (Mpa)	Cylinder (km/s)
1	18.87	3.95
2	27.24	4.81
3	28.28	5
4	33.65	5.15

Table 5. Cube concrete compressive strength test results (Rofa, 2018)

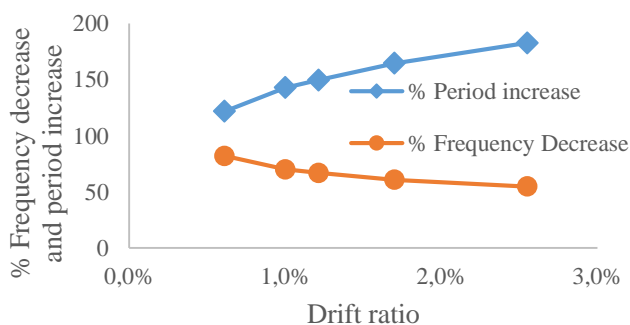
Sample	Destructive test	Non-destructive test
	fc' (Mpa)	fc' (Mpa)
Cube 1	15.10	4.39
Cube 2	19.13	4.98
Cube 3	23.09	5.45
Cube 4	27.87	5.92

#### 4.2 Frekuensi Alami, Periode, dan Drift ratio

Table 6. Period decrease, percentage frequency decrease, and difference percentage frequency

Step	Drift ratio	Frequency of	Perio	Period	Frequency	Difference%
	( $\delta/h$ ) (%)	Experiment (Hz)	d (T)	Increase (%)	Decrease (%)	
1	0%	8.03	0.12	100	100	-
2	0.60%	6.59	0.15	121.85	82.05	17.95
3	1.00%	5.62	0.18	142.88	69.97	12.08
4	1.20%	5.37	0.19	149.53	66.86	3.11
5	1.70%	4.88	0.2	164.55	60.76	6.1
6	2.60%	4.395	0.23	182.71	54.72	6.04

Source : Test result



Pengujian dinamik dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai frekuensi alami pada benda uji pada setiap beban siklik secara bertahap. Pada Gambar 5 diperlihatkan presentase penurunan frekuensi dan kenaikan perioda ketika terjadi perubahan performa struktur, mulai dari kondisi utuh sebelum terkena beban siklik yang memiliki nilai frekuensi 8.03 Hz hingga muncul retak pada step satu (pada drift 0.6%) berupa retak horizontal pada joint kolom-balok dengan nilai frekuensi 6.59 Hz. Pada step kedua, ketiga, keempat, dan kelima berturut-turut nilai frekuensi menurun menjadi 5.62 Hz, 5.37 Hz, 4.88 Hz, 4.39 Hz. Dari data yang didapat dapat diketahui persentase nilai penurunan frekuensi alami sebesar 100%, 82%, 69%, 66%, 60%, dan 54%. Dalam hal ini dapat dilihat bahwa penurunan performa terbesar terjadi pada drift 0.6% step pertama dengan nilai selisih 17.95%. Pada drift 1.0%, 1.2%, 1.7%, dan 2.6% terjadi penurunan tetapi tidak terlalu signifikan. Hal ini dijelaskan dalam Gambar 5 dan Tabel 6. Nilai perioda dalam penelitian ini dapat dilihat bahwa, semakin nilai drift ratio bertambah besar dan performa bangunan sudah tidak lagi utuh, maka perioda akan semakin bertambah besar. Hal ini berbanding terbalik dengan nilai frekuensi. Sehingga untuk melihat keadaan struktur tersebut sudah mengalami penurunan performa dapat dilihat dalam nilai periodanya semakin bertambah atau nilai frekuensinya akan semakin menurun.

Figure 5. percentage frequency decrease, period decrease, and drift ratio

Untuk mendapatkan model numeric yang sesuai dengan model eksperimen pada analisis SAP2000 dengan model portal 2D ada dua cara untuk mendapatkan nilai frekuensi alami yang mendekati eksperimen ketika terjadi retak karena pengaruh beban siklik. Cara pertama adalah dilakukan dengan merubah properties balok dan kolom pada pertemuan balok-kolom (digunakan momen inersia yang berbeda-beda). Asumsi Menurut SNI 2847:2013 disebutkan bahwa

faktor modifikasi momen inersia untuk kolom penampang retak sebesar 0.7 dan balok sebesar 0.35. Akan tetapi Penelitian ini dilakukan dengan cara percobaan mereduksi momen inersia secara bertahap dari keadaan utuh senilai 1 pada ujung kolom dan balok, kemudian koefisien momen inersia kolom direduksi menjadi 0.92, 0.68, 0.6, 0.5, 0.4. Penurunan faktor reduksi disesuaikan dengan kondisi performa model portal 2D setelah diberikan beban siklik sebanyak 5 step. Gambar 6 dapat dilihat bahwa semakin besar drift ratio maka performa struktur akan menurun ditandai dengan frekuensi alami yang menurun oleh reduksi momen inersia juga menurun. Reduksi momen inersia balok diambil setengah dari nilai momen inersia kolom. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan nilai frekuensi alami yang mendekati hasil eksperimen di laboratorium. Berikut adalah hasil dari analisis dapat dilihat pada Tabel. 7 .

Dapat terlihat bahwa frekuensi alami pada analisis menggunakan SAP2000 tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen.

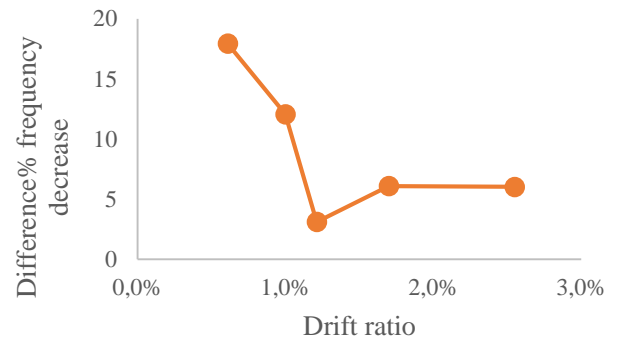


Figure 6. Difference percentage frequency decrease

Table 7. Summary recapitulation of natural frequency with analysis versus experiment

No	Frequency (Eksperiment)	Frequency (SAP)	Drift ratio (%)	Moment of Inertia SAP (column)	Moment of Inertia SAP (beam)	Note
1	8.01	8.32	0	1	1	Before cyclic load test
2	6.59	6.57	0.6	0.92	0.46	step 1
3	5.62	5.66	1	0.68	0.34	step 2
4	5.37	5.32	1.2	0.6	0.3	step 3
5	4.88	4.86	1.7	0.5	0.25	step 4
6	4.395	4.35	2.6	0.4	0.2	step 5

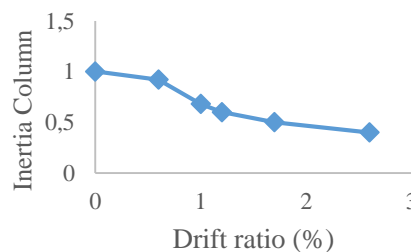


Figure 7. Decrease of moment inertia versus drift ratio

Cara kedua pada pertemuan kolom dan balok di release dan kemudian diberi nilai Pfixity M-33 , Percobaan memberikan nilai Pfixity M-33 terlihat dalam Gambar.8 Ketika terjadi kerusakan awal pada drift 0.6% didapatkan nilai Pfixity M-33 sebesar 300 untuk mendapatkan frekuensi 6.53Hz yang mendekati

hasil eksperimen sebesar 6.59 Hz. Nilai penurunan dapat dilihat dalam Tabel 8. Nilai Pfixity hanya berlaku untuk model dengan dimensi dan kasus yang sama seperti penelitian ini. dalam cara kedua ini penampang dianggap masih utuh dengan faktor modifikasi momen inersia sama dengan satu

Table 8. Decrease of Pfixity value versus drift ratio

No	Frequency (eksperiment)	Frequency (SAP)	Drift ratio (%)	Moment inertia		Nilai spring (rotation-2)	PFIKIT Y M-33	Note
				SAP (column)	SAP (beam)			
1	8.01	8.32	0	1	1	10	0	Before cyclic load
2	6.59	6.53	0.6	1	1	10	300	Step 1
3	5.62	5.67	1	1	1	10	185	Step 2
4	5.37	5.35	1.2	1	1	10	155	Step 3

5	4.88	4.89	1.7	1	1	10	120	Step 4
6	4.395	4.39	2.6	1	1	10	90	Step 5

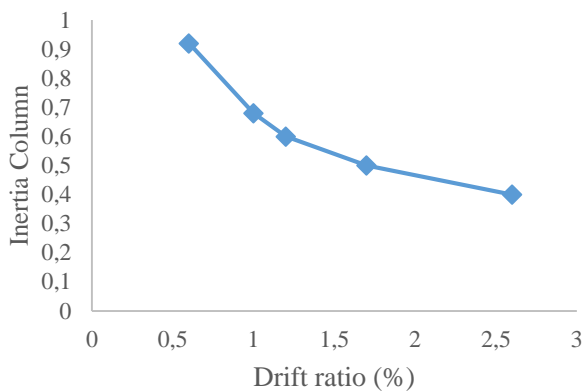


Figure 8. Decrease of release Pfixity M-33 versus drift ratio

#### 4.2 Beban dan displacement pada model portal 2D

Pada Gambar 9 memperlihatkan hubungan beban maksimum dan simpangan yang terjadi pada portal

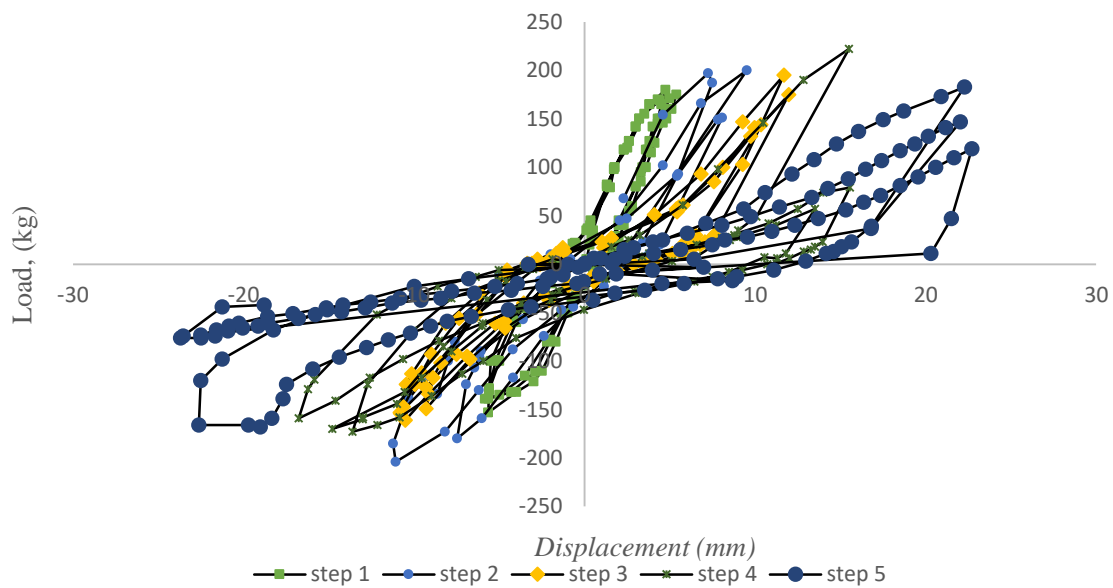


Figure 9. Graph of relation of force and displacement

#### 4.3 Pola retak pada model portal 2D

Retak awal pada portal 2D akibat beban siklik yang diberikan terjadi saat beban 180 kg pada step pertama. Keretakan ini terjadi pada kolom dekat pertemuan balok, letaknya di sudut bagian kiri atas. *First crack* dengan arah retak horizontal memiliki lebar retak 0,02 mm dan berlanjut hingga step terakhir. Pada step kelima yang terakhir ukuran retak mencapai 0,6 mm ketika beban sebesar 222 kg dimana beban tersebut

dan dihentikan pada step kelima dengan *drift ratio* sebesar 2,6 %, pada saat itu beban maksimum diperoleh nilai *displacement* ultimit sebesar 22.7 mm. Dalam hal ini sturuktur hanya dilihat ketika akan memasuki zona leleh dan kemudian di hentikan pada step lima terakhir. Berdasarkan FEMA 389 *Risk Management Series* , struktur bangunan beton yang memenuhi standart *life safety* yaitu dengan *drift ratio* sebesar 1%-2%. Apabila lebih dari 2% atau bahkan mencapai 4% maka struktur bangunan tersebut masuk dalam kategori *collapse prevention* ,dimana dalam keadaan ini struktur bangunan telah mengalami keruntuhan dan tidak dapat dihuni pasca gempa. Dari P maksimal leleh pada step ke -4 sebesar 222kg. Dan diperoleh *displacement* maksimal sebesar 15,49 mm. Salah satu indikasi bahwa struktur telah memasuki zona leleh , dapat dilihat dari Gambar 9 saat drift 2.6% yaitu saat bebannya tidak dapat dinaikkan dan *displacement* semakin bertambah. Pengujian dihentikan pada step ke-5.

adalah beban maksimal yang dicapai, karena beban sudah tidak mampu naik kembali pada pembacaan data logger. Keretakan portal terjadi pada hubungan kolom-balok dan kolom-sloof. Dapat terlihat bahwa pola retak yang terjadi merupakan jenis diagonal *cracking* Sketsa pola retak yang terjadi diperlihatkan pada Gambar.10 .

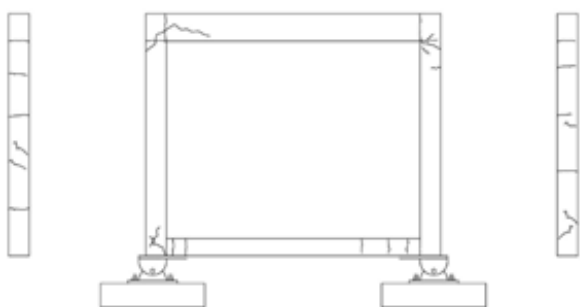


Figure 10. Sketch crack patterns on 2D portals

## 5 KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan diatas dapat diambil kesimpulan seperti berikut:

1. Dari data yang didapat dapat diketahui persentase nilai penurunan frekuensi alami sebesar 100%, 82%, 69%, 66%, 60%, dan 54% berturut-turut untuk drift rasio 0%, 0.6%, 1.0%, 1.2%, 1.7%, dan 2.6%
2. Semakin besar drift rasio semakin kecil perubahan frekuensi alaminya, perubahan terbesar terjadi pada drift rasio 0,6%. Frekuensi alami pada SAP2000 maupun eksperimen tidak jauh berbeda hasil yang didapat dengan merubah faktor inersia balok-kolom sesuai dengan kondisi keretakannya. Sesuai dengan SNI SNI 03-2847-2013 Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung bahwa faktor inersia pada struktur bangunan diisikan berdasarkan kondisi awal dengan nilai 1 dianggap masih utuh pada setiap elemen kolom-balok. Nilai faktor inersia akan menurun pada nilai kolom apabila telah mengalami kerusakan secara bertahap.
3. *Displacement* maksimal leleh yang terjadi pada portal yaitu sebesar 14.59 mm pada beban maksimum sebesar 222 kg dan *drift ratio* 1,0% Pola retak yang terjadi pada portal 2D di pertemuan kolom-dan balok berupa diagonal *cracking*.

## DAFTAR PUSTAKA

(NAKAMURA, 2000) *VULNERABILITY INVESTIGATION OF ROMAN COLOSSEUM USING MICROTREMOR*". Prepared for 12th WCEE 2000 in Auckland, NZ. 2660/6/AFEMA 389 .(2004) *Risk Management Series Primer for Design Professionals*. The Federal Emergency Management Agency. Washington DC.

(SUHENDRO, 2000) "*Analisis Dinamik Struktur I*". Diktat Ajar Mata Kuliah Analisis Dinamik

Struktur Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

(PARMO, 2014) *Kekuatan dan Daktilitas Perpindahan Kolom Pendek Beton Bertulang Persegi Dibawah Pengaruh Pembebanan Siklik*. UIN Sunan Ampel. Surabaya

(RIYANTO, 2017). Perilaku Sambungan Sayap Menerus dengan Baut Antara Balok Profil I dan Kolom Tabung Baja Isian Akibat Beban Siklik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta

(SARI, et al., 2018). Perilaku Lateral Siklik Portal Beton Bertulang Berisi Dinding Bata Merah. Universitas Syah Kuala, Banda Aceh.

(ROFA, 2019) "*Analisis Kekuatan Kolom Langsing Terhadap Beban Lateral Pada Rumah Sederhana Dengan Metode Nakamura*" Thesis Program S2 Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

(FEMA, 2004) *RISK MANAGEMENT SERIES*. The Federal Emergency Management Agency. Washington DC.

(PRAYUDA, 2015). "*PREDIKSI GAYA LATERAL IN PLANE MELALUI PERUBAHAN FREKUENSI ALAMI DAN REDAMAN STRUKTUR DINDING PASANGAN BATA 1/2 BATU DENGAN SPESI 1 PC : 4 KP : 10 PS MELALUI ANALISIS GETARAN MIKRO*" Thesis Program S2 Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.