

PENELITIAN KEANDALAN BANGUNAN SIPIL PADA STRUKTUR CEROBONG (STUDI KASUS : *CHIMNEY* PLTU PAITON UNIT 6 DAN 7)

Sugeng P. Budio, Indra Cahya, Kartika Puspa N., M. Hamzah Hasyim, Imran Jamaran

**Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
Jl. Mayjen Haryono 147 Malang**

ABSTRAK

Keandalan bangunan merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam perencanaan suatu gedung. Berdasarkan UU RI No. 28 Tahun 2002 disebutkan bahwa setiap bangunan gedung harus memenuhi persyaratan administratif dan persyaratan teknis. Persyaratan teknis meliputi persyaratan tata bangunan dan persyaratan keandalan bangunan gedung. Dengan demikian, setiap bangunan yang akan dirancang maupun yang sudah beroperasi harus mendapatkan pengawasan yang ketat terhadap kualitas bangunannya serta memiliki jaminan laik fungsi. Studi kasus yang dipakai dalam penelitian ini adalah *Chimney* pada PLTU Paiton yang terletak di Paiton. Bangunan ini didesain dengan waktu operasional selama 40 tahun. Akan tetapi, setelah 15 tahun beroperasi dan dilakukan pengecekan terhadap kondisi fisik lapangan, terdapat beberapa bagian bangunan yang mengalami keretakan. Untuk itu perlu dilakukan pengujian keandalannya. Pengujian dilakukan dengan melakukan *Hammer Test*, *UPV Test*, *Core Drill Testing*, *Crack Detection Testing*, *Concrete Cover Testing*, *Corrosion Testing*, *Rebar Inspection*, *Settlement Testing* dan *Visual Inspection*. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan beton adalah 45,83 MPa, permeabilitas beton 0,43 gr/mnt, porositas beton 3,57%, modulus elastisitas 31182,92 MPa. Adapun retak beton yang cukup besar ditemukan di elevasi +110 m sebesar 0,46 mm dan +220 m sebesar 0,38 mm. Rata-rata nilai resistifitas yang lebih besar dari 12 kΩm menunjukkan tingkat korosifitas rendah. Berdasarkan analisa diperoleh hasil bahwa terjadi penurunan kapasitas menjadi sebesar 85%.

Kata kunci : *chimney*, cerobong, keandalan, kuat tekan, Paiton

PENDAHULUAN

Keandalan bangunan merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam perencanaan suatu gedung. Berdasarkan UU RI No. 28 Tahun 2002 disebutkan bahwa setiap bangunan gedung harus memenuhi persyaratan administratif dan persyaratan teknis sesuai dengan fungsi bangunan gedung. Persyaratan teknis meliputi persyaratan tata bangunan dan persyaratan keandalan bangunan gedung, yaitu persyaratan kemampuan bangunan gedung untuk mendukung beban muatan, serta kemampuan bangunan gedung dalam mencegah dan menanggulangi bahaya kebakaran dan bahaya petir. Oleh karena itu, setiap bangunan yang akan dirancang maupun yang sudah beroperasi, terutama bangunan yang mempunyai fungsi vital serta merupakan bangunan dengan kepentingan orang banyak memerlukan pengawasan yang ketat terhadap kualitas

bangunannya dan memiliki jaminan laik fungsi.

Studi kasus yang dipakai dalam penelitian ini adalah *Chimney* pada PLTU Paiton yang terletak di Paiton, tepatnya di tepi pantai utara provinsi Jawa Timur, di Desa Binor, Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. *Chimney* merupakan suatu struktur cerobong yang berfungsi mengeluarkan uap hasil pembakaran batu bara di boiler. Bangunan ini didesain dengan waktu operasional selama 40 tahun. Akan tetapi, setelah 15 tahun beroperasi dan dilakukan pengecekan terhadap kondisi fisik lapangan, terdapat beberapa bagian bangunan yang mengalami keretakan. Oleh karena itu perlu diketahui keandalan bangunan chimney beserta aspek-aspek yang mempengaruhi keandalan tersebut.

Permasalahan keandalan bangunan diatur dalam Undang-undang Republik Indonesia Nomor 28 tahun 2002 tentang

Bangunan Gedung. Pada Bab IV Bagian Pertama (Umum) mengenai Persyaratan Bangunan Gedung, disebutkan bahwa "Setiap bangunan gedung harus memenuhi persyaratan administratif dan persyaratan teknis sesuai dengan fungsi bangunan gedung". Persyaratan teknis meliputi persyaratan tata bangunan dan persyaratan keandalan bangunan gedung. Bagian Keempat mengenai Persyaratan Keandalan Bangunan Gedung, Paragraf Kedua mengenai "Persyaratan Keselamatan" disebutkan bahwa persyaratan keselamatan bangunan gedung meliputi persyaratan kemampuan bangunan gedung untuk mendukung beban muatan, serta kemampuan bangunan gedung dalam mencegah dan menanggulangi bahaya kebakaran dan bahaya petir. Persyaratan kemampuan bangunan gedung untuk mendukung beban muatannya merupakan kemampuan struktur bangunan gedung yang stabil dan kukuh dalam mendukung beban muatan.

Pada pasal 18 dijelaskan bahwa persyaratan kemampuan struktur bangunan gedung yang stabil dan kukuh dalam mendukung beban muatan merupakan kemampuan struktur bangunan gedung yang stabil dan kukuh sampai dengan kondisi pembebanan maksimum dalam mendukung beban muatan hidup dan beban muatan mati, serta untuk daerah/zona tertentu kemampuan untuk mendukung beban muatan yang timbul akibat perilaku alam. Besarnya beban muatan dihitung berdasarkan fungsi bangunan gedung pada kondisi pembebanan maksimum dan variasi pembebanan agar bila terjadi keruntuhan pengguna bangunan gedung masih dapat menyelamatkan diri.

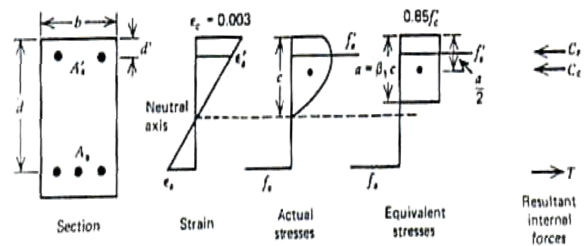
Analisis Kapasitas Cerobong

Momen kapasitas penampang digambarkan pada **Gambar 1**. Perhitungan gaya tarik tulangan (T), gaya tekan beton (Cc) dan gaya tekan tulangan (Cs) adalah sebagai berikut:

Gaya tarik tulangan (T) = $A_s \cdot f_s$

Gaya tekan beton (Cc) = $0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$

Gaya tekan tulangan (Cs) = $A_s' \cdot f'_s$



Gambar 1. Momen Kapasitas Penampang

Asumsi awal yang dipakai dalam perhitungan bisa dijabarkan berikut ini:

baja tarik sudah leleh, $f_s = f_y$

baja tekan sudah leleh, $f'_s = f_y$

Persamaan keseimbangan untuk tekan dan tarik adalah sebagai berikut:

$$C = T$$

$$C_c + C_s = T$$

$$0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a + A_s' \cdot f_y = A_s \cdot f_y$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$\text{Letak garis netral (c)} = \frac{a}{\beta_1}$$

Kontrol:

$$\text{- regangan baja tarik } (\epsilon_s) = \epsilon_c \cdot \frac{d - c}{c}$$

$$\text{tegangan baja tarik (fs)} = \epsilon_s \cdot E_s$$

$$\text{- regangan baja tekan } (\epsilon_s') = \epsilon_c \cdot \frac{c - d'}{c}$$

$$\text{tegangan baja tekan (f's)} = \epsilon_s' \cdot E_s$$

Jika $f_s \geq f_y$ (tulangan tarik sudah leleh) dan $f'_s \geq f_y$ (tulangan tekan sudah leleh), maka sesuai asumsi awal. Langkah selanjutnya adalah menghitung momen nominal penampang.

Jika $f_s \geq f_y$ (tulangan tarik sudah leleh) dan $f'_s < f_y$ (tulangan tekan belum leleh), maka tidak sesuai asumsi awal, perlu dihitung kembali keseimbangan gaya tarik = gaya tekan dengan tulangan tekan pada kondisi belum leleh.

Asumsi kedua yang dipakai adalah sebagai berikut:

baja tarik sudah leleh, $f_s = f_y$
 baja tekan belum leleh, $f's = \epsilon s' \cdot E_s$

$$\epsilon s' = \epsilon c \cdot \frac{c - d'}{c}$$

Persamaan keseimbangan untuk tekan dan tarik adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C &= T \\ Cc + Cs &= T \\ 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a + As' \cdot f's &= As \cdot f_y \\ a &= \frac{As \cdot f_y - As' \cdot f's}{0,85 \cdot f'c \cdot b} \end{aligned}$$

Letak garis netral (c) = a / β_1

Kontrol :

$$\text{- regangan baja tarik } (\epsilon s) = \epsilon c \cdot \frac{d - c}{c}$$

$$\text{- tegangan baja tarik } (f_s) = \epsilon s \cdot E_s$$

$$\text{- regangan baja tekan } (\epsilon s') = \epsilon c \cdot \frac{c - d'}{c}$$

$$\text{tegangan baja tekan } (f's) = \epsilon s' \cdot E_s$$

Momen nominal penampang (M_n):

$$\begin{aligned} M_n &= Cc \cdot (d - a/2) + Cs \cdot (d - d') \\ &= 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a(d - a/2) + As' \cdot f's \cdot (d - d') \\ \phi M_n &= 0,8 \text{ Mn} \end{aligned}$$

Reliabilitas Struktur

Probabilitas kegagalan berhubungan dengan porsi dari distribusi rasio keamanan dimana angka probabilitas kurang dari 1, sehingga dapat diformulasikan sebagai $Z = X/Y \leq 1$. Dimana X adalah kapasitas dan Y adalah kebutuhan dari sebuah sistem/struktur, dalam hal ini adalah momen ultimate. Oleh sebab itu maka probabilitas kegagalan (p_f) adalah:

$$p_f = \Pr(Z \leq 1) = F_z(1)$$

Sedangkan probabilitas ketidakkagalan adalah:

$$r = 1 - p_f = \Pr(Z > 1) = 1 - F_z(1)$$

Dimana dapat diartikan sebagai probabilitas bertahan dari sebuah bangunan, atau reabilitas sederhana. Ketika hubungan distribusi probabilitas X dan Y diketahui,

maka keandalan bangunan dapat dievaluasi dengan mendeterminasi cdf dari X/Y.

Jika X dan Y adalah independen dan terdistribusi secara log normal, maka probabilitas kegagalan dapat dihitung dengan:

$$\begin{aligned} \mu_{\ln Z} &= \mu_{\ln(X)} - \mu_{\ln(Y)} \\ &= \ln \mu_X - \frac{1}{2} \ln(1 + V_X^2) - \ln \mu_Y \\ &\quad + \frac{1}{2} \ln(1 + V_Y^2) \end{aligned}$$

dimana $V_X = \frac{\sigma_X}{\mu_X}$ dan $V_Y = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y}$ masing-masing adalah koefisien variasi dari X dan Y

$$\begin{aligned} \sigma_{\ln(Z)}^2 &= \sigma_{\ln(X)}^2 + \sigma_{\ln(Y)}^2 \\ &= \ln(1 + V_X^2) + \ln(1 + V_Y^2) \end{aligned}$$

Sehingga probabilitas kegagalan dari struktur adalah:

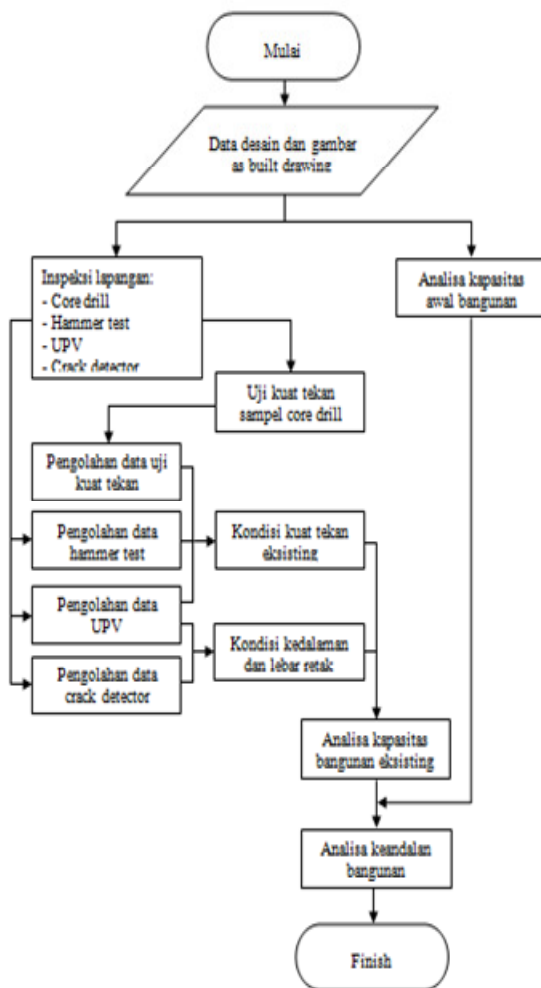
$$p_f = F_z(1) = \Phi\left(\frac{\ln 1 - \mu_{\ln(Z)}}{\sigma_{\ln(Z)}}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_{\ln(Z)}}{\sigma_{\ln(Z)}}\right)$$

Dimana $\Phi(\cdot)$ merupakan standar distribusi normal. Jika X dan Y terdistribusi secara normal, maka probabilitas kegagalan dapat dihitung dengan menggunakan formula:

$$P_f = \Phi\left[-\frac{\mu_X - \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right] r = \Phi\left(\frac{\mu_X - \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right)$$

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 2**. Penelitian dilakukan dengan cara melakukan investigasi lapangan, kemudian dilakukan pengolahan, sehingga dapat diambil kesimpulan. Dari kesimpulan yang ada diberikan rekomendasi. Investigasi yang dilakukan mencakup : *Hammer Test, UPV Test, Core Drill Testing, Crack Detection Testing, Concrete Cover Testing, Corrosion Testing, Rebar Inspection, Settlement Testing, Visual Inspection*.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Total area inspeksi ada 4 lokasi yaitu : dasar, elevasi 110 meter, elevasi 160 meter, dan elevasi 210 meter.

Analisis Investigasi Lapangan

1. Hammer Test

Kuat desain baja tulangan adalah sebesar 400 MPa, sedang kuat tekan beton didasarkan pada tiga analisis yaitu hammer tes, Core Drill dan UPV test.

2. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Test

Berdasarkan UPV test, diperoleh hasil kuat tekan beton f'_c sebesar 45.8345 MPa.

3. Core Drill Testing

Hasil pengujian Core Drill dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Hasil Pengujian Core Drill

No.	Sample Weight (gr)	Sample Height (cm)	f'_c (kg/cm ²)	Average f'_c (kg/cm ²)
1	1940	11.7	555.09	489.85
2	1700	9.8	559.24	
3	1920	11.2	472.24	
4	1840	10.4	372.82	

4. Crack Detection Testing

Investigasi retak dilakukan di beberapa lokasi, hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Lebar Retak

No	Level	Element	Crack Width (mm)
1	+0.00	Pile cap	0.48
		Opening window	0.38
2	+110	Opening window	0.46
3	+160	Wall	0.38
4	+210	Opening window	0.26
		Wall	0.44

Secara umum, sebagian besar retak ditemukan di windows opening. Pada elevasi +110 m and +210 m ditemukan retak rambut dengan lebar 0.46 mm and 0.38 mm. Berdasar ACI 224 Code, toleransi lebar retak untuk *dry air or protective membrane* adalah 0,41 mm. Dengan demikian besaran retak masih dapat ditoleransi.

Tabel 3. Analisis Kedalaman Cover dengan Profometer dan Scanning Bar

Level	Cover Depth (mm)				Average
	Profometer		Scanning Bar		
0 AREA1	63.678	59.781	56.265	57.095	58.438
0 AREA2	56.600		57.352		
0 AREA3	59.067		57.667		
110 AREA1	67.889	67.658	47.506	57.386	62.522
110 AREA2	66.156		49.895		
110 AREA3	68.533		64.117		
110 AREA4	66.256		63.593		
110 AREA5	69.456		61.821		
160 AREA1	73.889	73.811	53.802	61.377	67.594
160 AREA2	74.600		62.315		
160 AREA3	72.944		68.012		
210 AREA1	61.489	70.706	57.383	66.343	68.524
210 AREA2	79.922		75.302		

(Source :Laboratory analysis)

Berdasar investigasi dengan *Profometer and Scanning Bar*, rata-rata nilai tebal selimut untuk ketinggian 0, +110 m, +160 m and +210 m adalah 58,438 mm, 62,522 mm, 67,594 mm, dan 68,524 mm.

5. Uji Korosi

Hasil resistivitas yang diperoleh adalah:

Tabel 4. Analisis Resistivitas dengan Resipod

No	Level	Area	Mean Value of Resistivity (kΩcm)
1	+0.00	Area I	762.3
		Area II	324.4
		Area III	319.6
2	+110		"Open Line" indication Bad connection
3	+160		of the two outer probes to the concrete
4	+210		surface.

(Source :Laboratory analysis)

Rata-rata nilai resistivitas pada level +0.00 adalah lebih besar dari 12 kΩcm. Hal ini menunjukkan bahwa korosi terjadi dengan tingkat yang sangat rendah.

6. Settlement Testing

Berdasarkan investigasi lapangan menggunakan Total Station hasilnya adalah sbb :

- 1.G.Fl.Admin Building= +5000 mm
- 2.Chimney North = +4999 mm
- 3.Steam Generator Area= +4884 mm

Tabel 5. Perhitungan Beban Mati *Chimney*

No. Element	Elevation 1 (mm)	Elevation 2 (mm)	Height of Element (mm)	Height of Element (m)	Outside Diameter (mm)	Outside Diameter (m)	Wall Thickness (mm)	Wall Thickness (m)	Chimney Volume (m ³)	Chimney Weight (kg)	Additional Load (kg)
1	204500	215000	10500	10.5	20440.000	20.440	320.000	0.320	107.880	258911.468	10274.26461
2	194500	204500	10000	10	20982.762	20.983	347.333	0.347	114.480	274751.603	11447.98348
3	184500	194500	10000	10	21247.524	21.248	360.667	0.361	120.374	288898.608	12037.442
4	174500	184500	10000	10	21512.286	21.512	374.000	0.374	126.380	303311.780	12637.99085
5	164500	174500	10000	10	21777.048	21.777	387.333	0.387	132.496	317991.120	13249.63002
6	154500	164500	10000	10	22041.810	22.042	400.667	0.401	138.724	332936.628	13872.3595
7	144500	154500	10000	10	22306.571	22.307	414.000	0.414	145.062	348148.303	14506.17931
8	134500	144500	10000	10	22571.333	22.571	427.333	0.427	151.511	363626.147	15151.08944
9	124500	134500	10000	10	22836.095	22.836	440.667	0.441	158.071	379370.157	15807.08989
10	114500	124500	10000	10	23100.857	23.101	454.000	0.454	164.742	395380.336	16474.18066
11	104500	114500	10000	10	23365.619	23.366	467.333	0.467	171.524	411656.682	17152.36175
12	94500	104500	10000	10	23630.381	23.630	480.667	0.481	178.416	428199.196	17841.63317
13	84500	94500	10000	10	23895.143	23.895	494.000	0.494	185.420	445007.878	18541.9949
14	74500	84500	10000	10	24159.905	24.160	507.333	0.507	192.534	462082.727	19253.44695
15	64500	74500	10000	10	24424.667	24.425	520.667	0.521	199.760	479423.744	19975.98933
16	54500	64500	10000	10	24689.429	24.689	534.000	0.534	207.096	497030.929	20709.62202
17	44500	54500	10000	10	24954.190	24.954	547.333	0.547	214.543	514904.281	21454.34504
18	34500	44500	10000	10	25218.952	25.219	560.667	0.561	222.102	533043.801	22210.15837
19	24500	34500	10000	10	25483.714	25.484	574.000	0.574	229.771	551449.489	22977.06203
20	14500	24500	10000	10	25748.476	25.748	587.333	0.587	237.551	570121.344	23755.05601
21	5000	14500	9500	9.5	26000.000	26.000	600.000	0.600	232.792	558700.838	24504.4227
TOTAL										8714947.059	

Dari hasil ini diketahui bahwa tidak terjadi adanya penurunan. Namun rata-rata defleksi antara atas dengan bawah cerobong adalah 69 mm. Ini disebabkan adanya efek beban angin dan *human error*.

7. Inspeksi Visual

Beberapa retak yang ditemukan pada *windows opening*. Retak juga didapat di area pile cap pondasi, hanya saja retaknya termasuk kategori retak rambut.

Analisis Beban Statis Pada Cerobong Beban Mati

Perhitungan Beban mati dapat dilihat pada **Tabel 5** di bawah ini.

Beban Gempa

Perhitungan beban gempa dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Beban Angin

Kecepatan angin dasar di Paiton diambil sebesar 200 km/jam atau sama dengan 55,556 m/s. Perhitungan beban angin untuk masing-masing pias struktur disajikan dalam **Tabel 7**.

Tabel 6. Perhitungan Beban Gempa

No. Pias	Elevasi 1 (m)	Elevasi 2 (m)	K ₁	K ₂	K ₃	Kec. Angin Dasar (m/s)	Kec. Angin Desain (m/s)	Tekanan Angin (N/m ²)	Area (m ²)	Wind Load (N/m ²)	Wind Load (kg/m ²)	Wind Load (kg/m)
1	204500	215000	1	1.13	1	55.556	62.778	37.6667	337.124	357.833	36.4764	1171.15
2	194500	204500	1	1.13	1	55.556	62.778	37.6667	329.596	357.833	36.4764	1202.25
3	184500	194500	1	1.12	1	55.556	62.222	37.3333	333.755	354.667	36.1536	1206.65
4	174500	184500	1	1.12	1	55.556	62.222	37.3333	337.914	354.667	36.1536	1221.68
5	164500	174500	1	1.12	1	55.556	62.222	37.3333	342.073	354.667	36.1536	1236.72
6	154500	164500	1	1.1	1	55.556	61.111	36.6667	346.232	348.333	35.508	1229.40
7	144500	154500	1	1.1	1	55.556	61.111	36.6667	350.391	348.333	35.508	1244.17
8	134500	144500	1	1.1	1	55.556	61.111	36.6667	354.550	348.333	35.508	1258.93
9	124500	134500	1	1.05	1	55.556	58.333	35	358.709	332.5	33.894	1215.81
10	114500	124500	1	1.05	1	55.556	58.333	35	362.867	332.5	33.894	1229.90
11	104500	114500	1	1.05	1	55.556	58.333	35	367.026	332.5	33.894	1244.00
12	94500	104500	1	1.05	1	55.556	58.333	35	371.185	332.5	33.894	1258.09
13	84500	94500	1	1	1	55.556	55.556	33.3333	375.344	316.667	32.28	1211.61
14	74500	84500	1	1	1	55.556	55.556	33.3333	379.503	316.667	32.28	1225.03
15	64500	74500	1	1	1	55.556	55.556	33.3333	383.662	316.667	32.28	1238.46
16	54500	64500	1	0.95	1	55.556	52.778	31.6667	387.821	300.833	30.666	1189.29
17	44500	54500	1	0.95	1	55.556	52.778	31.6667	391.980	300.833	30.666	1202.04
18	34500	44500	1	0.95	1	55.556	52.778	31.6667	396.138	300.833	30.666	1214.80
19	24500	34500	1	0.83	1	55.556	46.111	27.6667	400.297	262.833	26.7924	1072.49
20	14500	24500	1	0.67	1	55.556	37.222	22.3333	404.456	212.167	21.6276	874.74
21	5000	14500	1	0.67	1	55.556	37.222	22.3333	387.987	212.167	21.6276	883.29

Tabel 7.Perhitungan Beban Angin

No. Element	Structure Weight (kg)	Additional Load (kg)	Wi (kg)	hi (m)	Wi x hi (kg)	Fi X-Y (kg)	Vx (kg)	Number of Node	Fi Node (kg)	Fi Node (ton)
1.00	258911.47	10274.26	269185.73	210	56529003.91	303247.82	303247.818	179	1694.12	1.69412
2.00	274751.60	11447.98	286199.59	199.5	57096817.59	306293.83	609541.653	143	2141.91	2.14191
3.00	288898.61	12037.44	300936.05	189.5	57027381.49	305921.35	915463	179	1709.06	1.70906
4.00	303311.78	12637.99	315949.77	179.5	56712983.93	304234.77	1219697.77	143	2127.52	2.12752
5.00	317991.12	13249.63	331240.75	169.5	56145307.19	301189.49	1520887.26	179	1682.62	1.68262
6.00	332936.63	13872.36	346808.99	159.5	55316033.52	296740.88	1817628.15	143	2075.11	2.07511
7.00	348148.30	14506.18	362654.48	149.5	54216845.18	290844.33	2108472.47	179	1624.83	1.62483
8.00	363626.15	15151.09	378777.24	139.5	52839424.43	283455.2	2391927.67	143	1982.2	1.9822
9.00	379370.16	15807.09	395177.25	129.5	51175453.52	274528.89	2666456.56	179	1533.68	1.53368
10.00	395380.34	16474.18	411854.52	119.5	49216614.73	264020.77	2930477.33	179	1474.98	1.47498
11.00	411656.68	17152.36	428809.04	109.5	46954590.3	251886.22	3182363.55	143	1761.44	1.76144
12.00	428199.20	17841.63	446040.83	99.5	44381062.5	238080.62	3420444.17	179	1330.06	1.33006
13.00	445007.88	18541.99	463549.87	89.5	41487713.59	222559.35	3643003.53	143	1556.36	1.55636
14.00	462082.73	19253.45	481336.17	79.5	38266225.82	205277.8	3848281.32	179	1146.8	1.1468
15.00	479423.74	19975.99	499399.73	69.5	34708281.45	186191.33	4034472.66	143	1302.04	1.30204
16.00	497030.93	20709.62	517740.55	59.5	30805562.76	165255.34	4199728	179	923.214	0.92321
17.00	514904.28	21454.35	536358.63	49.5	26549751.98	142425.19	4342153.19	143	995.98	0.99598
18.00	533043.80	22210.16	555253.96	39.5	21932531.39	117656.28	4459809.47	143	822.771	0.82277
19.00	551449.49	22977.06	574426.55	29.5	16945583.25	90903.975	4550713.45	179	507.843	0.50784
20.00	570121.34	23755.06	593876.40	19.5	11580589.8	62123.66	4612837.1	179	347.06	0.34706
21.00	558700.84	24504.42	583205.26	9.5	5540449.972	29721.546	4642558.65	180	165.12	0.16512
TOTAL			9078781.36		865428208.3					

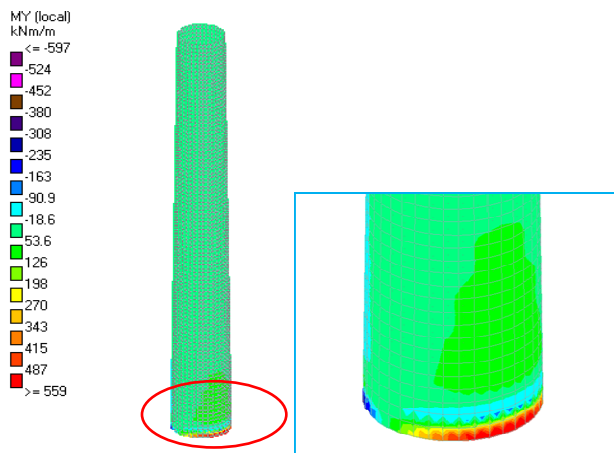
Analisis Pembebanan Statis Ekvivalen

Perhitungan kombinasi beban dilakukan menggunakan Staad Pro dan dihasilkan gaya-gaya dalam sebagaimana pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Momen Maksimum Pada Setiap Elevasi

Elevation (m)	Mu max (KNm / m ²)
+ 0	1172,124
+ 110	12,393
+ 160	2,202
+210	2,297

(Source : Calculation)

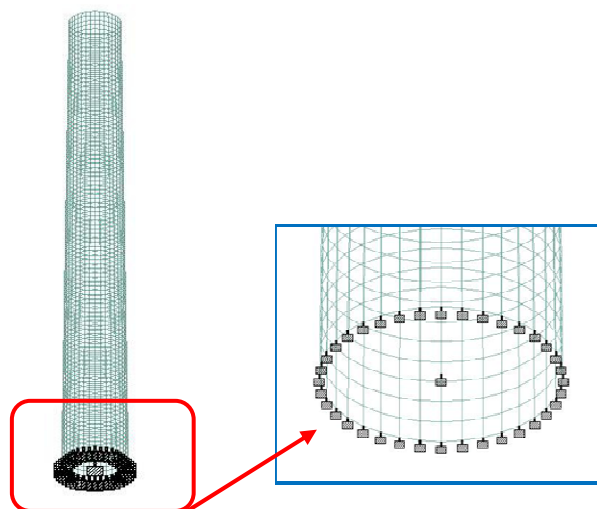


Gambar 3. Analisis statis ekivalen chimney

Analisis Dinamis Untuk Pembebanan Chimney

A. Numerical Model

Chimney dimodelkan dalam bentuk 3D untuk dilakukan simulasi dinamis. Jumlah elemen yang digunakan adalah sebesar 3600. Element properties seperti elastic modulus number and flexural rigidity dihitung berdasarkan hasil kuat tekan. Struktur chimney ini diasumsikan memiliki support di bawahnya. Gambar di bawah ini menunjukkan model 3D yang dipergunakan dalam analisa.



Gambar 4. Model Numerik 3D

Modes

Frekuensi alami dan periode alami dari struktur cerobong diperoleh dari simulasi dinamis pada Staad Pro. Dilakukan 6 mode dalam proses perhitungan data. Nilai frekuensi natural untuk masing-masing mode adalah:

Tabel 9. Frekuensi Alami dan Periode Alami Untuk Masing-masing Mode

Mode	Frequency (Cycles / sec)	Period (Sec)
1	0.468	2.13835
2	0.468	2.13835
3	1.408	0.71001
4	1.408	0.71001
5	1.714	0.58351
6	1.714	0.58351

Macam-macam bentuk mode



Gambar 5. Bentuk Mode

Analisa kapasitas akan menggunakan mode pertama.

Analisis Kapasitas *Chimney*

Hasil rekapitulasi kapasitas *chimney* per segmen dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Kapasitas *chimney* pada kondisi eksisting

Level 0	: 51682	kNm
Level 110	: 13946	kNm
Level 160	: 13184	kNm
Level 210	: 9888.95	kNm

Tabel 10. Perhitungan Kapasitas *Chimney*

No	1st Elevation (mm)	2nd Elevation (mm)	Segment Height (mm)	Total Height (mm)	Cover d' (mm)	Plate Thickness (mm)	Chimney Diameter (mm)
1	204500	215000	10500	210000	68.524	320.00	20440.00
2	194500	204500	10000	199500	68.331	347.33	20982.76
3	184500	194500	10000	189500	68.146	360.67	21247.52
4	174500	184500	10000	179500	67.962	374.00	21512.29
5	164500	174500	10000	169500	67.778	387.33	21777.05
6	154500	164500	10000	159500	67.594	400.67	22041.81
7	144500	154500	10000	149500	66.579	414.00	22306.57
8	134500	144500	10000	139500	65.565	427.33	22571.33
9	124500	134500	10000	129500	64.551	440.67	22836.10
10	114500	124500	10000	119500	63.536	454.00	23100.86
11	104500	114500	10000	109500	62.522	467.33	23365.62
12	94500	104500	10000	99500	62.114	480.67	23630.38
13	84500	94500	10000	89500	61.705	494.00	23895.14
14	74500	84500	10000	79500	61.297	507.33	24159.90
15	64500	74500	10000	69500	60.888	520.67	24424.67
16	54500	64500	10000	59500	60.480	534.00	24689.43
17	44500	54500	10000	49500	60.072	547.33	24954.19
18	34500	44500	10000	39500	59.663	560.67	25218.95
19	24500	34500	10000	29500	59.255	574.00	25483.71
20	14500	24500	10000	19500	58.846	587.33	25748.48
21	5000	14500	9500	9500	58.438	600.00	26000.00
Total Height			210000	mm			

Tabel 11.Kalkulasi Kapasitas *Chimney* Sebelum Retak

Segment No.	Total Height (mm)	Plate Thickness (mm)	Chimney Diameter (mm)	Reinforced Diameter (mm)	Mn (kNm)	φ Mn (kNm)
1	210000.00	320.00	20440.00	16.00	12396.41	9917.13
2	199500.00	347.33	20982.76	16.00	16527.59	13222.07
3	189500.00	360.67	21247.52	16.00	16527.60	13222.08
4	179500.00	374.00	21512.29	16.00	16527.61	13222.09
5	169500.00	387.33	21777.05	16.00	16527.62	13222.10
6	159500.00	400.67	22041.81	19.00	17479.69	13983.75
7	149500.00	414.00	22306.57	19.00	17479.76	13983.81
8	139500.00	427.33	22571.33	19.00	17479.83	13983.86
9	129500.00	440.67	22836.10	19.00	17479.90	13983.92
10	119500.00	454.00	23100.86	19.00	17479.97	13983.97
11	109500.00	467.33	23365.62	19.00	17480.04	13984.03
12	99500.00	480.67	23630.38	19.00	23305.26	18644.21
13	89500.00	494.00	23895.14	19.00	23305.30	18644.24
14	79500.00	507.33	24159.90	19.00	23305.34	18644.28
15	69500.00	520.67	24424.67	19.00	23305.39	18644.31
16	59500.00	534.00	24689.43	22.00	23434.52	18747.61
17	49500.00	547.33	24954.19	25.00	60514.63	48411.71
18	39500.00	560.67	25218.95	25.00	75638.46	60510.77
19	29500.00	574.00	25483.71	25.00	90761.14	72608.92
20	19500.00	587.33	25748.48	25.00	75638.88	60511.11
21	9500.00	600.00	26000.00	25.00	75639.10	60511.28

Tabel 12. Analisis *Chimney* setelah Struktur Retak

Segment No.	Total Height (mm)	Chimney Diameter (mm)	Reinforced Diameter (mm)	Mn (kNm)	φ Mn (kNm)
1	210000.00	20440.00	16.00	12361.19	9888.95
2	199500.00	20982.76	16.00	16480.21	13184.17
3	189500.00	21247.52	16.00	16480.33	13184.27
4	179500.00	21512.29	16.00	16480.45	13184.36
5	169500.00	21777.05	16.00	16480.57	13184.46
6	159500.00	22041.81	19.00	17429.92	13943.94
7	149500.00	22306.57	19.00	17430.61	13944.49
8	139500.00	22571.33	19.00	17431.30	13945.04
9	129500.00	22836.10	19.00	17431.99	13945.59
10	119500.00	23100.86	19.00	17432.68	13946.15
11	109500.00	23365.62	19.00	17433.37	13946.70
12	99500.00	23630.38	19.00	23242.37	18593.89
13	89500.00	23895.14	19.00	23242.74	18594.19
14	79500.00	24159.90	19.00	23243.11	18594.49
15	69500.00	24424.67	19.00	23243.48	18594.78
16	59500.00	24689.43	22.00	23372.57	18698.06
17	49500.00	24954.19	25.00	55485.71	44388.57
18	39500.00	25218.95	25.00	62678.90	50143.12
19	29500.00	25483.71	25.00	69367.60	55494.08
20	19500.00	25748.48	25.00	63983.01	51186.41
21	9500.00	26000.00	25.00	64602.52	51682.02

Dynamic Stiffness

Deskripsi *chimney* yang digunakan sebagai input data adalah

Length : L = 210 m = 688.97 ft

- The layer thickness: Vary from bottom to top (see appendix for detail)

- Cross-sectional area: A = 359.245 ft²

- Mass/foot length : $m = \frac{150 \times 359.245}{32.2}$

= 1.6735 kip-sec²/ft²

- Second moment of area: I = 2.61x10⁵ ft⁴

- Elastic modulus :

$$E = (3320\sqrt{f'c} + 6900) \left(\frac{w_c}{2,346} \right)^{1.5}$$

$$E = (3320\sqrt{48985} + 6900) \left(\frac{2400}{2,346} \right)^{1.5} = 3118924 \text{ MPa}$$

$$= 6.5127 \times 10^8 \text{ lb/ft}^2$$

- Flexural rigidity :

$$EI = 1.6998 \times 10^{11} \text{ kip-ft}^2$$

Untuk menentukan periode alami :

$$\omega_n = \frac{3.66}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{3.66}{688.97^2} \sqrt{\frac{1.6998 \times 10^{11}}{1.6735}} = 2.4790 \text{ rad/sec}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2.53 \text{ sec}$$

Faktor Keamanan

Faktor keamanan *Chimney* dapat dianalisa dari Z= X/Y. Nilai X berasal dari kapasitas sebelum retak, sedang nilai Y berasal dari kapasitas setelah retak

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa kapasitas eksisting menjadi sebesar 85%.

Probabilitas Keandalan

Dari analisa Probabilitas keandalan dapat diketahui bahwa *chimney* masih handal. Namun berdasar analisa factor keamanan, kapasitas yang tersisa saat ini berkisar 85% dari kapasitas awal sebelum retak terjadi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil analisa pada bab sebelumnya antara lain :

1. Struktur Cerobong Paiton unit 6 dan 7 masih handal berdasarkan analisa kapasitas dan analisa statistik.
2. Perlu ada perbaikan pada bagian *chimney* yang cacat/ rusak untuk

- menghindari problem lebih lanjut pada struktur bangunan.
3. Dari hasil uji hammer test secara statistic, dapat disimpulkan bahwa kuat tekan beton chimney adalah seragam, sehingga kuat tekan core drill dapat dijadikan representasi kuat tekan beton secara keseluruhan.
 4. Seiring dengan ditemukannya retak pada beberapa bagian struktur cerobong, diperkirakan kapasitas struktur yang tersisa adalah sebesar 85%. Kapasitas ini akan terus berkurang apabila tidak diambil tindakan perbaikan.

Saran

1. Retak yang ditemukan pada struktur hendaknya segera dilakukan perbaikan. Beberapa metode perbaikan sementara seperti injeksi retak dengan epoxy, *crack weld floor repair*, *elastic poxy with sand*, dapat digunakan sebagai alternative perbaikan. Namun hal ini tidak dapat mengembalikan penurunan kapasitas yang telah terjadi. Oleh karena itu retrofit menggunakan material tambahan sebaiknya dilakukan pada struktur untuk meningkatkan kapasitas struktur cerobong.

2. Inspeksi rutin pada struktur cerobong hendaknya dijadwalkan, sehingga dapat kontinyu mengamati adanya cacat/kerusakan yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Dipohusodo, Istimawan. *Struktur Beton Bertulang*. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama, 1999.
- Kia Wang, Chu; Charles R Salmon.1994. *Desain Beton Bertulang Jilid 1 Edisi Keempat*. Erlangga: Jakarta.
- Nawy, Edward G. 1998. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. PT. Refika Aditama: Bandung.
- Nurlina, Siti. Buku Ajar, *Struktur Beton Bertulang*. Malang : 2008.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 25/Prt/M/2007 Tanggal 9 Agustus 2007 Tentang Pedoman Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung.
- SNI 03 – 2847 – 2002.*Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (Beta Version)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2002 Tentang Bangunan Gedung.