

Evaluasi Struktur Beton *Outfall Condenser* Di PLTU Tarahan

Muhammad Sigit Darmawan, Nur Achmad Husin, Ridho Bayuaji, Dicky Imam Wahyudi,
Srie Subekti, Ibnu Pudji Rahardjo, Sungkono Karsidi, Sulchan Arifin,
R. Buyung Anugraha Affandhie, dan Yuyun Tajunnisa

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Email:

yuyun_t@ce.its.ac.id

ABSTRAK

Sistem kerja PLTU menggunakan dua komponen, yaitu komponen utama dan komponen pendukung. Salah satu komponen pendukung adalah *outfall discharge tunnel (outfall condenser)*. PLTU UPP Tarahan telah menetapkan PT ITS Tekno Sains (ITSTS) untuk melakukan *assessment* pada *outfall condenser* karena berada di lingkungan korosif dan telah beroperasi selama 12 tahun. Langkah *assessment* yang dilakukan yaitu (1) survei pendahuluan dan pengumpulan data sekunder, (2) survei lapangan, (3) pengujian lapangan dan pengambilan sampel (data primer), (4) melakukan pengujian di laboratorium, (5) melakukan pemodelan dan analisis struktur, (6) melakukan perhitungan sisa kekuatan struktur akibat korosi, (7) usulan metode perbaikan serta (8) estimasi biaya perbaikan. Hasilnya, retak pada *outfall condenser* pada hasil inspeksi visual umumnya dapat dimasukkan dalam kategori ringan dan hanya beberapa titik yang sudah masuk kategori berat karena tulangnya sudah mengalami korosi dan terbuka. Pengujian *destructive* maupun *non-destructive* menunjukkan kekuatan beton sudah diatas mutu yang direncanakan yaitu sebesar 21 MPa. Namun, hasilnya belum memenuhi syarat mutu beton untuk lingkungan air laut. Perkiraan kekuatan elemen struktur *outfall condenser* dengan memperhitungkan efek korosi menggunakan skenario *average case* yang menunjukkan tidak mengalami penurunan kekekuatan yang signifikan. Hasil *assessment* tes menyimpulkan bahwa kekuatan beton diatas mutu perencanaan yaitu 21 MPa, namun, hal tersebut masih belum memenuhi syarat mutu beton untuk lingkungan air laut. Perhitungan kekuatan elemen struktur memperhitungkan efek korosi dengan skenario *average case*. Hasil menunjukkan bahwa tahun 2020 kekuatan *outfall condenser* berkurang menjadi sebesar 91% dari kekuatan awal. Tahun 2025 menjadi sebesar 82%, dan tahun 2030 menjadi sebesar 74% dari kekuatan awal.

Kata Kunci: PLTU UPP Tarahan, struktur *outfall condenser*, asesmen

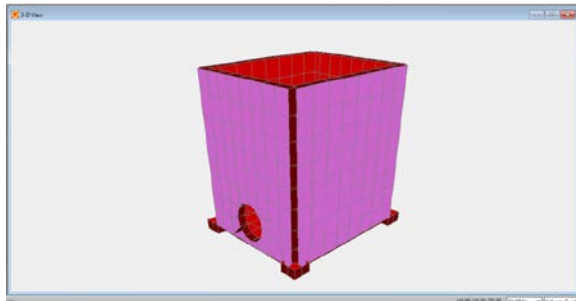
PENDAHULUAN

Sistem kerja PLTU menggunakan dua komponen, yaitu komponen utama dan komponen pendukung. Salah satu komponen pendukung adalah infrastruktur *outfall discharge tunnel (outfall condenser)*. PT. PLN (Persero) unit induk pembangkitan Sumatera bagian selatan di bagian pelaksana pembangkitan Tarahan menganggap perlu untuk melakukan evaluasi struktur sehubungan dengan kondisi saat ini dan rencana penambahan infrastruktur *outfall condenser*. Hal ini disebabkan karena umur infrastruktur *outfall condenser* yang telah beroperasi selama 12 tahun dan letak struktur ini berada di tepi pantai, yaitu terletak pada lokasi yang terbuka serta tidak terlindungi dari pengaruh perubahan cuaca. Kondisi lingkungan yang demikian ini dapat mengakibatkan penurunan kekuatan dan memperpendek umur rencana

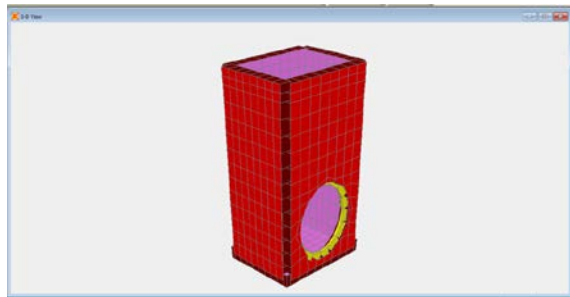
(*design life*) dari *outfall condenser*. Berkaitan dengan hal tersebut, PLTU UPP Tarahan telah menetapkan PT ITS Tekno Sains (ITSTS) melalui kontrak No. 7C00006377.Pj/613/AI/DAN.02.01/UPKTARAHAN/2019 tanggal 10 September 2019 untuk melakukan *assessment* struktur *outfall condenser*. Studi ini perlu dilakukan karena peran penting *outfall condenser* dalam operasional unit pembangkit listrik. Karena bila terjadi gangguan pada struktur *outfall condenser*, maka penyediaan energi listrik dapat terganggu dan mungkin terhenti sama sekali. Untuk mencegah terjadinya hal tersebut, maka perlu dilakukan evaluasi/*assessment* terhadap struktur *outfall condenser*. Agar secara lebih dini diketahui kemungkinan terjadinya kerusakan pada struktur *outfall condenser*. Sehingga langkah-langkah pencegahan dan perbaikan dapat segera dilakukan. Kajian terhadap struktur *outfall condenser* dilaksanakan di Unit 3 dan 4 PLTU UPP Tarahan. Kegiatan *assessment* oleh Tim ITS Tekno Sains meliputi: (1) penyelidikan kondisi

Tabel 1. Faktor Koreksi Benda Uji Silinder untuk Berbagai Rasio L/D

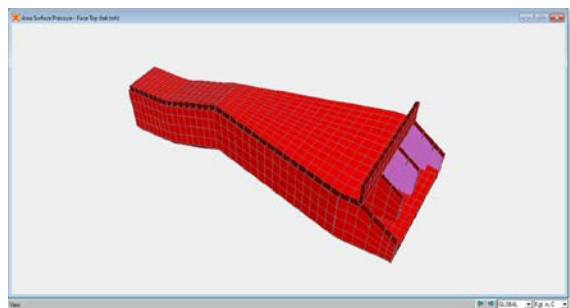
Rasio Panjang/Diameter (L/D)	Faktor Koreksi Kekuatan
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87



Gambar 1. Pemodelan 3-D Seal pit.



Gambar 2. Pemodelan 3-D Struktur Manhole.

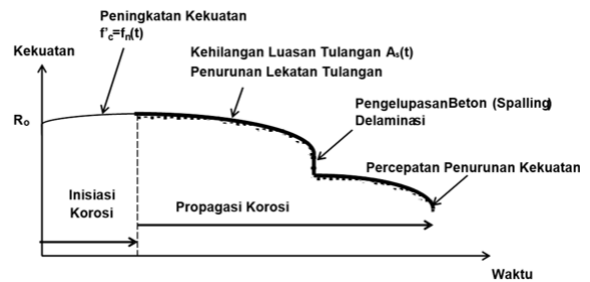


Gambar 3. Pemodelan 3-D Struktur Outlet.

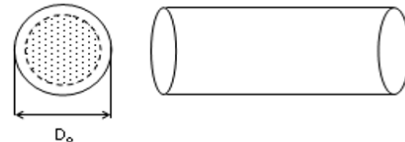
struktur *outfall condenser* secara visual; (2) pengujian material di lapangan dan di laboratorium; (3) pengukuran kelurusan vertical; (4) pengukuran elevasi untuk deteksi adanya penurunan; (5) analisis kekuatan struktur eksisting; dan (6) penyusunan rekomendasi perbaikan dan atau perkuatan struktur pada bagian-bagian yang mengalami kerusakan. Dengan langkah ini diharapkan kondisi struktur *outfall condenser* di PLTU UPP Tarahan dapat dikembalikan sesuai dengan kebutuhan desain dan umur layan struktur dapat lebih panjang.

TAHAPAN STUDI DAN METODOLOGI

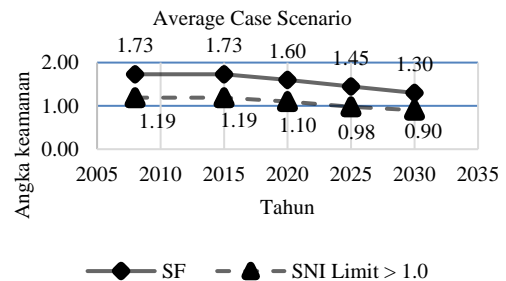
Tahapan evaluasi/assessment struktur *outfall condenser* berupa: (1) pengumpulan data sekunder; pengamatan secara visual di lapangan; (2) pengambilan contoh dan pengukuran di lapangan untuk mendapatkan



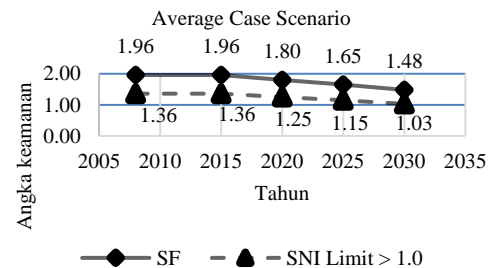
Gambar 4. Penurunan kekuatan struktur beton bertulang akibat korosi.



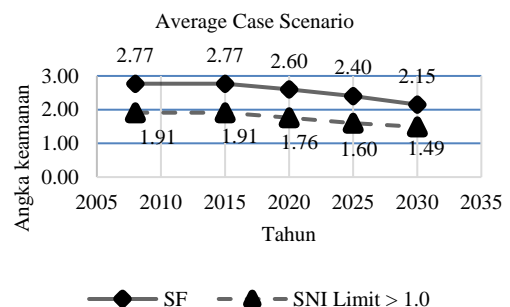
Gambar 5. Model Korosi Seragam (Uniform Corrosion).



Gambar 6. Angka Keamanan Struktur Dinding Depan/ Belakang Seal Pit dengan Anggapan Kondisi Rata-Rata.



Gambar 7. Angka Keamanan Struktur Slab Dasar Seal Pit dengan Anggapan Kondisi Rata-Rata.



Gambar 8. Angka Keamanan Struktur Slab Dasar Outlet dengan Anggapan Kondisi Rata-Rata.

data primer; (3) analisa laboratorium; (4) analisa kekuatan struktur yang tersisa; dan (5) kemudian menyusun alternatif perbaikan yang harus dilaksanakan. Tahapan studi adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Gaya Momen Mu Maksimum Elemen Struktur *Outfall Condenser*.

Elemen Struktur	Dimensi		Penulangan	Mu (ton-m)
	(m)	Arah		
Dinding Depan/belakang <i>Seal pit</i>	0.50	Arah Horizontal	D19-100	8.57
		Arah Vertikal	D13-250	7.44
Dinding Samping <i>Seal pit</i>	0.50	Arah Horizontal	D19-125	5.07
		Arah Vertikal	D13-250	6.80
Slab Dasar <i>Seal pit</i>	0.55	Arah Memanjang	D16-150	13.26
		Arah Melintang	D16-150	7.75
Dinding <i>Manhole</i>	0.50	Arah Horizontal	D16-150	2.85
		Arah Vertikal	D16-150	3.56
Slab Dasar <i>Manhole</i>	0.50	Arah Memanjang	D16-150	6.75
		Arah Melintang	D16-150	8.90
Dinding Samping <i>Outlet</i>	0.50	Arah Horizontal	D16-150	1.98
		Arah Vertikal	D16-150	9.92
Dinding Sekat <i>Outlet</i>	0.40	Arah Horizontal	D13-150	0.84
		Arah Vertikal	D13-150	1.16
Slab Bawah <i>Outlet</i>	0.70	Arah Memanjang	D25-150	14.48
		Arah Melintang	D25-150	12.57
Slab Bawah <i>Outlet</i>	0.50	Arah Memanjang	D16-150	5.91
		Arah Melintang	D16-150	10.63

Tabel 3. Kapasitas Momen Nominal awal Mn Elemen Struktur *Outfall Condenser*.

Elemen Struktur	Tebal (m)	Arah	Penulangan	Mn	
				(ton-m)	Ø Mn
Dinding Depan/belakang <i>Sealpit</i>	0.50	Arah Horizontal	D19-100	41.46	37.32
		Arah Vertikal	D13-250	9.88	8.89
Dinding Samping <i>Sealpit</i>	0.50	Arah Horizontal	D19-125	34.53	31.08
		Arah Vertikal	D13-250	9.88	6.80
Slab Dasar <i>Sealpit</i>	0.55	Arah Memanjang	D16-150	20.04	18.04
		Arah Melintang	D16-150	19.76	17.79
Dinding <i>Manhole</i>	0.50	Arah Horizontal	D16-150	22.62	20.35
		Arah Vertikal	D16-150	22.73	20.46
Slab Dasar <i>Manhole</i>	0.50	Arah Memanjang	D16-150	22.62	20.35
		Arah Melintang	D16-150	22.73	20.46
Dinding Samping <i>Outlet</i>	0.50	Arah Horizontal	D16-150	22.73	20.46
		Arah Vertikal	D16-150	22.62	20.35
Dinding Sekat <i>Outlet</i>	0.40	Arah Horizontal	D13-150	12.63	11.37
		Arah Vertikal	D13-150	12.47	11.23
Slab Bawah <i>Outlet</i>	0.70	Arah Memanjang	D25-150	67.91	61.12
		Arah Melintang	D25-150	71.34	64.21
Slab Bawah <i>Outlet</i>	0.50	Arah Memanjang	D16-150	22.73	20.46
		Arah Melintang	D16-150	22.62	20.35

Survei Pendahuluan dan Pengumpulan Data Sekunder

Studi pendahuluan dan pengumpulan data sekunder dilakukan dengan mempelajari dokumen-dokumen teknis dari PT. PLN (Persero) unit induk pembangkitan Sumatera bagian selatan unit pelaksana pembangkitan Tarahan. Data sekunder meliputi:

1. Mendapatkan data/informasi mengenai data teknis struktur *outfall condenser*, meliputi: mutu beton dan baja yang digunakan saat perencanaan dan pelaksanaan;
2. Mendapat data/informasi terkait gambar-gambar perencanaan dan *as-built drawing*;
3. Mendapatkan informasi tentang riwayat bangunan terkait kejadian-kejadian yang berpengaruh terhadap struktur.

Survei Lapangan, Pengujian Lapangan dan Pengambilan Sampel (Data Primer)

Melakukan survei, pengujian di lapangan dan pengambilan sample (data primer) yang meliputi:

1. Pencatatan pengamatan visual terhadap kerusakan-kerusakan yang ada, antara lain lokasi pelapukan, lokasi retak dan lokasi korosi;
2. Pengukuran elevasi *outfall condenser* untuk mengetahui kemungkinan adanya penurunan struktur;
3. Pengambilan sample tanah dengan bor dalam;
4. Pengujian kekuatan dan keseragaman mutu beton dengan uji Hammer yang dilakukan menyebar pada elemen beton struktur yang diuji (American Society for Testing and Materials, 2013), menggunakan alat *SilverSchmidt* dari *Proceq*;
5. Pengujian Ultrasonic dilakukan untuk mengetahui kepadatan beton (ASTM, 2009);
6. Pengukuran Lebar Retak dan Kedalaman Retak dilakukan dengan bantuan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) tipe "TICOv1.21-PROCEQ" sedangkan pengukuran lebar retak dengan Loupe;
7. Pengujian bar locator dilakukan untuk mengetahui tebal selimut beton dan jumlah, serta posisi tulangan terpasang pada setiap elemen struktur beton bertulang. Pengujian ini dilakukan pada elemen struktur *outfall*

Tabel 4. Ringkasan Penurunan Kekuatan Struktur Beton *Outfall Condenser* PLTU UPP Tarahan akibat Korosi.

	Manhole	
	Worst Case	Average Case
Tahun Pembangunan	2007	2007
Tahun Operasional	2008	2008
Umur Saat Ini	12	12
Kuat Tekan Silinder (MPa)	22.59	27.07
Tebal Cover (mm)	29.00	63.90
Kadar Klorida di Permukaan (%)	0.296	0.113
Kadar Klorida di Tulangan (%)	0.268	0.094
Waktu Korosi Inisiasi Ti (tahun)	1	7.2
Pengurangan Diameter Tulangan (mm/tahun)	0.43	0.12
Sisa Kekuatan Tahun 2020 (%)	37%	91%
Sisa Kekuatan Tahun 2025 (%)	19%	82%
Sisa Kekuatan Tahun 2030 (%)	7%	74%

Tabel 5. Kecepatan Korosi dari Pengukuran Sample Tulangan.

Elemen Struktur	Tebal Korosi Permukaan (μm)	Kecepatan Korosi (mm/tahun)	
		Pengukuran	Kecepatan Korosi teoritis (mm/tahun)
			Worst Case Scenario
Dinding <i>Manhole</i> 2	200.77	0.02	
Dinding <i>Manhole</i> 3	821.51	0.07	
Dinding <i>Sealpit</i> 3	2341.35	0.20	
Dinding <i>Sealpit</i> 4	2314.18	0.19	0.43
Dinding <i>Manhole</i> 5	208.01	0.02	
Dinding <i>Outlet</i>	143.13	0.01	
	Maksimum	0.20	
	Rata Rata	0.08	0.12

condenser dengan menggunakan alat *Profometer 5+* dari *Proceq*;

- Pengukuran nilai potensial yang ada pada baja tulangan menggunakan alat *Canin+* dari *Proceq*;
- Pengukuran nilai *resistivity* beton untuk mengetahui tingkat ketahanan beton terhadap korosi;
- Pengukuran tingkat permeabilitas di lapangan untuk mengetahui mudah/tidaknya unsur yang berada di luar masuk kedalam beton;
- Pengambilan sample beton (benda uji) dengan *core drill* (ASTM C42-90).

Faktor koreksi sampel silinder hasil *core drill* dapat dilihat pada tabel 1.

Melakukan Pengujian di Laboratorium

Jenis pengujian di laboratorium yang dilakukan pada sampel beton dan tanah meliputi:

- Pengujian kekuatan tekan beton terhadap benda uji *core drill* (ASTM C39-93A);
- Pengujian kuat tarik tulangan baja (ASTM A370-94);
- Uji tingkat durabilitas beton bertulang berupa tes penetrasi chlor, tes pH, porositas beton, dan pengukuran ketebalan korosi tulangan Pengukuran tingkat permeabilitas di lapangan untuk mengetahui mudah/tidaknya unsur yang berada di luar masuk kedalam beton;
- Pengujian index properties sampel tanah di laboratorium meliputi pengujian kadar air (*moisture content test*), pengujian berat jenis (*specific gravity test*), analisa saringan (*sieve analysis test*) dan pengujian batas konsistensi atterberg (*atterberg limit test*);
- Pengujian *engineering properties* di laboratorium meliputi pengujian berat satuan isi (*natural density weight*), pengujian tekan bebas (*unconfined*

compression test), pengujian geser langsung (*direct shear test*), pengujian triaxial (*triaxial test*) dan pemeriksaan konsolidasi (*consolidation test*).

Melakukan Pemodelan dan Analisis Struktur

Tahapan pemodelan dan analisa struktur ini terdiri dari 2 (dua) kegiatan utama, yaitu:

- Pemodelan struktur *outfall condenser*;
- Penentuan gaya-gaya dalam maksimum pada penampang kritis akibat beban-beban yang bekerja.

Melakukan Perhitungan Sisa Kekuatan Struktur akibat Korosi

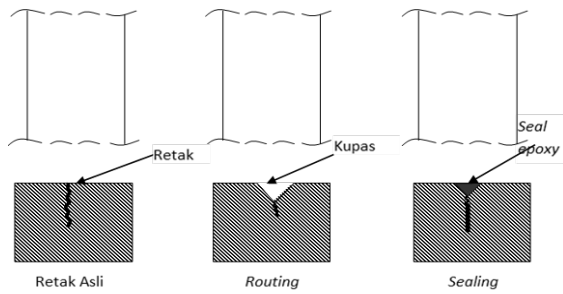
Perhitungan sisa kekuatan struktur akibat korosi ini berupa:

- Perhitungan kekuatan struktur *outfall condenser* pada kondisi awal (selesai pembangunan);
- Perhitungan kekuatan struktur *outfall condenser* pada kondisi saat ini dan 10 tahun yang akan datang, dengan memperhitungkan pengaruh korosi bila ada.

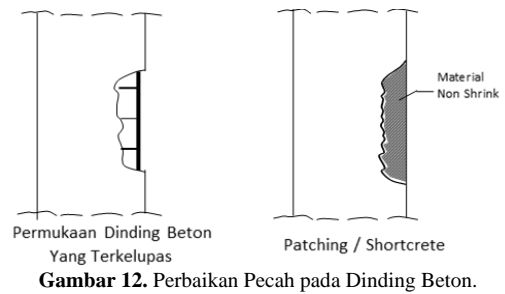
HASIL ASSESSMENT STRUKTUR OUTFALL CONDENSER PLTU TARAHAN

Hasil Survei Kondisi Eksisting

Kualitas pekerjaan beton terlihat dari tidak bagusnya sambungan antara beton lama dan baru (*cold joint*). Kondisi ini diperparah dengan mutu beton rencana yang hanya sebesar 21 MPa; jauh dibawah mutu beton yang biasa dipakai di lingkungan air laut sebesar 35 MPa. Mutu beton yang rendah dapat mempercepat terjadinya proses korosi pada tulangan. Retak pada *outfall condenser* pada umumnya dapat dimasukkan dalam kategori ringan dan sedang. Hanya beberapa titik yang sudah masuk kategori



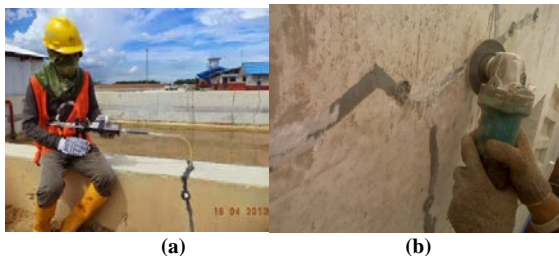
Gambar 9. Urutan Perbaikan Retak.



Gambar 12. Perbaikan Pecah pada Dinding Beton.



Gambar 10. (a) Nipel injeksi (b) Pemasangan Nipel Injeksi.



Gambar 11. (a) Epoxy injection (b) Pemotongan Bekas Nipel.

berat karena tulangnya sudah dalam keadaan berkarat dan terbuka.

Hasil Assessment Pengukuran Elevasi Struktur Outfall Condenser dan Hasil Pengujian Tanah

Hasil pengukuran elevasi menunjukkan tidak ada indikasi adanya penurunan. Struktur *outfall condenser* menggunakan tiang pancang sebagai pondasi (dari Gambar *as-built*) dan menumpu pada tanah yang cukup keras dengan SPT > 40, sehingga kemungkinan terjadi penurunan relatif sangat kecil.

Hasil Assessment Non-Destructive Test

Hasil pengujian *non-destructive test* sebagai berikut:

1. Uji *Hammer*. Bila dikorelasikan dengan kuat tekan beton, maka nilai kuat tekan rata-rata beton dari hasil uji hammer adalah sebesar 29.95 MPa. Dari gambar *as-built* diketahui bahwa kuat tekan beton yang ditetapkan sebesar 21 MPa. Kuat tekan rata-rata hasil uji hammer pada *outfall condenser* sudah melebihi dari kuat tekan yang ditetapkan.
2. Uji *Ultrasonic Pulse Velocity*. Hasil uji UPV dapat dilakukan perkiraan tingkat kepadatan beton (BS1881-1986, 2004) dan nilai kuat tekan beton, bila dikorelasikan dengan hasil kuat tekan beton inti. Dari uji UPV diperoleh kuat tekan sebesar 28.20 MPa, kuat tekan ini sudah melebihi kuat tekan yang ditetapkan sebesar 21 MPa.



Gambar 13. Proses Pengecoran.

3. Uji *Bar Locator*. Rata-rata hasil yang didapat adalah jarak tulangan vertikal 157.1 mm, jarak tulangan horisontal 153.6 mm, tebal selimut 65.7 mm dan 63.9 mm. Syarat tebal selimut beton untuk struktur *outfall condenser* sebesar 50 mm (sisi dalam) dan 70 mm (sisi luar). Namun demikian, pada umumnya untuk lingkungan air laut minimal tebal selimut ditetapkan sebesar 75 mm.
4. Uji *Half-cell potential*. Hasil uji ini didapatkan rata-rata nilai potensial sebesar -197 mV. Ini berarti secara rata-rata, kemungkinan terjadinya korosi di struktur beton *outfall condenser* sekitar 10%.
5. Uji lebar dan kedalaman retak. Hasil uji menunjukkan kedalaman dan lebar retak yang nilai rata-ratanya sebesar 65 mm dan 0.17 mm. Nilai lebar retak rata-rata sudah melebihi lebar retak maksimum untuk kondisi lingkungan air laut sebesar 0.15 mm, seperti diatur oleh ACI Committee 224 (*American Concrete Institute*).

Hasil Assessment Uji Destructive

Hasil pengujian *destructive* pada sampel beton *core drill* adalah sebagai berikut:

1. Uji kuat tekan beton inti. Pengujian di laboratorium terhadap silinder beton yang diambil dengan uji *core drill* pada elemen struktur *outfall condenser* memberikan hasil kuat rata-rata benda uji silinder beton adalah sebesar $f'_{cr} = 27.07$ MPa dengan nilai kuat tekan terendah sebesar $f'_{c-min} = 22.59$ MPa dan nilai kuat tekan tertinggi sebesar $f'_{c-mak} = 38.81$ MPa. Nilai rata-rata hasil uji tekan beton benda uji *core drill* pada *outfall condenser* sudah melebihi kuat tekan yang ditetapkan pada Gambar *as-build* sebesar 21 MPa. Namun belum memenuhi syarat mutu beton pada lingkungan air laut.
2. Uji tarik baja tulangan. Hasil pengujian kuat tarik benda uji baja tulangan dari struktur *outfall condenser* diperoleh kuat tarik leleh terendah sebesar $f_{y-min} = 418$ MPa dan nilai kuat tarik leleh tertinggi sebesar f_{y-}

- mak = 514 MPa, dengan nilai kuat tarik leleh rata-rata baja tulangan adalah $f_y-r = 471$ MPa. Kuat tarik yang disyaratkan pada gambar *as-built* sebesar 400 MPa.
3. Uji tingkat durabilitas beton. Uji tingkat durabilitas beton bertulang meliputi uji penetrasi *chlor*, uji pH, dan karbonasi dengan *phenolphthalein*.
 - a. Uji karbonasi menunjukkan bahwa kondisi beton sudah tidak baik. Karbonasi beton terjadi hampir di seluruh permukaan. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil uji karbonasi yang semua sisi samping beton inti yang terkena cairan tersebut hanya sedikit yang warnanya menjadi ungu kemerahan.
 - b. Uji pH juga menunjukkan ada penurunan pH yang cukup besar, dimana hasil tes menghasilkan pH terendah sebesar 9.30 dan rata-rata sebesar 11.02. Beton yang masih baik mempunyai $pH > 12.5$.
 - c. Uji penetrasi *chloride* menunjukkan kadar klorida rata-rata beton pada kedalaman ± 60 mm (pada posisi tulangan berada) diperoleh nilai sebesar 0.094% (2.26 kg/m³), sementara batas yang ditetapkan dalam beberapa referensi berkisar antara 0.6 s/d 1.4 kg/m³. Kadar klorida rata-rata tersebut sudah diatas nilai ambang batas yang ditetapkan.

PEMODELAN DAN ANALISA STRUKTUR

Pemodelan dan analisis struktur bertujuan untuk menentukan besarnya gaya-gaya dalam yang bekerja pada elemen struktur *outfall condenser*. Gaya-gaya ini akan digunakan sebagai tolok ukur untuk menentukan tingkat kekuatan elemen struktur *outfall condenser* pada kondisi awal, saat ini, dan 10 tahun mendatang. Untuk menghitung angka keamanan struktur pada kondisi awal, maka dilakukan perhitungan kekuatan nominal struktur berdasarkan data pada *as-built drawing*. Hasil perhitungan ini akan diketahui perbandingan antara kekuatan nominal elemen struktur *outfall condenser* dengan gaya-gaya dalam yang dipikul elemen tersebut. Angka perbandingan ini dinyatakan sebagai angka keamanan (*Safety Factor/SF*) pada kondisi awal.

Data Perencanaan

Data perencanaan untuk melakukan perhitungan struktur berupa Gambar *as-built outfall condenser* yang diberikan oleh PT. PLN (Persero) unit induk pembangkitan Sumatera bagian selatan unit pelaksana pembangkitan Tarahan. Dari Gambar *as-built* dapat diketahui:

1. Mutu Beton. Mutu beton yang digunakan yaitu $f_c' = 21$ MPa (K-250).
2. Mutu Baja. Tegangan leleh (f_y) sebesar 400 MPa untuk tulangan ulir dan 240 MPa untuk tulangan polos.
3. Dimensi dan data perhitungan *outfall condenser*:
 - a. Tebal selimut beton rencana 50 mm untuk bagian dalam dan 70 mm untuk bagian luar;
 - b. Dimensi elemen struktur;
 - c. Penulangan yang dipakai;

- d. Beban-beban yang digunakan dalam analisa struktur terdiri dari: beban mati; beban hidup; beban air; beban tekanan tanah; beban tekanan air; beban uplift; beban gempa (Badan Standardisasi Nasional, 2012).

Pemodelan Struktur

Struktur *outfall condenser* yang terdiri dari *seal pit*, *manhole* dan *outlet* merupakan elemen struktur plat dan dinding dengan material beton, sehingga dalam memodelkan kedua elemen tersebut pada pemodelan struktur menggunakan program elemen hingga (*finite element program*) digunakan elemen cangkang (*shell*). Gambar 1 sampai dengan Gambar 3 menyajikan pemodelan struktur *outfall condenser* menggunakan program SAP 2000.

Analisis Struktur

Selanjutnya gaya lentur Mu maksimum yang terjadi pada elemen struktur *outfall condenser* disajikan pada Tabel 2.

PERKIRAAN KEKUATAN STRUKTUR BETON OUTFALL CONDENSER AKIBAT PENGARUH KOROSI

Penurunan kekuatan bangunan beton di lingkungan air laut terutama disebabkan adanya korosi pada tulangan. Korosi akan menyebabkan pengurangan luas tulangan terpasang, yang selanjutnya akan menurunkan kekuatan bangunan dalam memikul beban-beban yang bekerja. Demikian pula korosi yang terjadi pada struktur baja tiang pancang dapat menyebabkan pengurangan ketebalan elemen baja. Pengurangan ketebalan ini selanjutnya akan dapat menurunkan kekuatan elemen tersebut dalam memikul beban.

Perkiraan Kekuatan Sisa Struktur Beton Akibat Korosi

Proses korosi baja tulangan pada struktur beton dapat dibedakan menjadi 2 (dua) tahapan, yaitu:

1. Inisiasi korosi (*corrosion initiation*)

Proses inisiasi korosi diawali dengan masuknya unsur klorida (Cl⁻) kedalam beton melalui berbagai mekanisme (antara lain permeasi, difusi, absorpsi, isapan/aksi kapiler) dan mencapai posisi dimana baja tulangan berada. Dengan berjalannya waktu, konsentrasi klorida pada baja tulangan akan semakin bertambah, hingga mencapai nilai konsentrasi kritis yang diperlukan untuk merusak lapisan pelindung pasif pada permukaan baja tulangan. Bila tersedia oksigen (O₂) dan air (H₂O) pada permukaan logam dalam jumlah yang cukup maka akan terjadi proses korosi. Selama tahap inisiasi korosi masih belum terjadi penurunan kekuatan struktur beton karena tulangan baru akan mulai mengalami korosi. Waktu yang diperlukan hingga terjadinya permulaan proses korosi pada besi tulangan disebut waktu inisiasi korosi.

2. Propagasi korosi (*corrosion propagation*)

Tahap selanjutnya dari proses korosi adalah proses pengurangan luas penampang tulangan akibat proses korosi. Tahap ini disebut propagasi korosi. Pada tahap ini mulai terjadi penurunan kapasitas penampang struktur beton bertulang. Secara skematis kedua tahap korosi dapat diterangkan pada Gambar 4.

Kulitas beton juga menentukan kecepatan masuknya garam kedalam beton. Beton dengan kulitas baik akan memberi perlindungan yang lebih baik pada tulangan dibandingkan beton dengan kualitas rendah. Oleh sebab itu semua standar beton mewajibkan memakai mutu beton yang cukup tinggi untuk kondisi lingkungan Klorida. Namun, dari data perencanaan didapatkan bahwa mutu beton minimal yang digunakan pada struktur *outfall condenser* hanya sebesar 21 MPa. Hal itu sangat jauh dari standar yang ditentukan SNI-03-2847 yang mensyaratkan mutu beton sebesar 35 MPa untuk lingkungan klorida/air laut (Badan Standar Nasional, 2013).

Setelah tahap inisiasi korosi terlampaui, maka tulangan mulai mengalami korosi dan berkurang luasannya. Pada studi ini dianggap tulangan mengalami kehilangan luasan yang seragam pada permukaannya seperti tergambar pada Gambar 5.

Perkiraan Penurunan Kekuatan Struktur Beton Outfall Condenser

Tabel 4 menunjukkan bahwa dengan memakai anggapan *worst case scenario* pada tahun 2020 kekuatan struktur beton telah berkurang menjadi 37% dari kekuatan awal. Selanjutnya bila tidak ada tindakan perbaikan sama sekali maka kekuatan struktur beton terus menerus menurun menjadi sebesar 19% dari kekuatan awal pada tahun 2025 dan 7.0% dari kekuatan awal pada tahun 2030. Perlu dipahami bahwa kemungkinan terjadinya kondisi paling buruk (*worst case scenario*) adalah sangat kecil sekali karena anggapan yang dipakai adalah dengan memakai semua nilai variabel yang menghasilkan kecepatan korosi maksimum. Demikian pula bila melihat kondisi struktur beton *Outfall Condenser* PLTU UPP Tarahan pada saat ini masih dalam kondisi yang relatif cukup baik dan belum banyak ditemukan bagian yang mengalami korosi pada tulangannya.

Penurunan Angka Keamanan Struktur Beton

Bila menggunakan kondisi rata-rata (*average case*) sebagai data input untuk analisa kekuatan, maka kekuatan struktur beton akan berkurang seperti disajikan pada Tabel 4. Akhir tahun 2030 kekuatannya sudah akan berkurang menjadi 74% dari kekuatan awalnya, dengan anggapan tidak ada perbaikan sama sekali. Untuk memudahkan pemahaman, nilai SL dan SF dari 3 (tiga) elemen struktur beton yang paling kritis disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6, 7, dan 8 dengan anggapan kondisi rata-rata (*Average Case Scenario*). Ketiga elemen ini merupakan elemen struktur dengan nilai SL dan SF yang paling kecil dibandingkan dengan elemen struktur lainnya.

Gambar 6 menunjukkan bahwa sampai dengan tahun 2025, elemen struktur dinding depan/belakang Sealpit, nilai SL-nya telah berubah menjadi sebesar $0.98 < 1.0$. Hal

ini berarti elemen struktur tersebut sudah tidak memenuhi ketentuan desain seperti yang diatur dalam (Badan Standar Nasional, 2013) Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung tahun 2013. Selanjutnya pada tahun 2030, nilai SL elemen struktur ini akan terus menurun menjadi 0.9. Namun demikian, elemen struktur ini belum akan mengalami keruntuhan pada tahun 2020 karena nilai SF-nya (angka keamanannya) masih sebesar $1.30 > 1.0$. Sebagai bahan perbandingan, maka perhitungan kecepatan korosi berdasarkan pengukuran ketebalan karat/korosi sample tulangan disajikan pada Tabel 5. Tebal korosi yang diukur dianggap terjadi selama 12 tahun (umur bangunan).

Tabel 5 menunjukkan bahwa kecepatan korosi riil terbesar berdasarkan sampel tulangan hanya sebesar 0.2 mm/tahun. Kecepatan korosi ini jauh lebih kecil dibandingkan kecepatan korosi teoritis berdasarkan anggapan skenario terburuk, yaitu sebesar 0.43 mm/tahun dan. Dengan demikian skenario kondisi terburuk ini tidak terjadi di lapangan. Hasil survei kerusakan struktur *outfall condenser* tidak menunjukkan terjadinya kondisi ini.

Perhitungan memakai kondisi *Average Case Scenario* memperoleh kecepatan teoritis korosi sebesar 0.12 mm/tahun, yang sangat mendekati kecepatan korosi rata-rata hasil pengukuran sebesar 0.08 mm/tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi yang terjadi di lapangan lebih mendekati hasil perhitungan yang memakai anggapan kondisi rata-rata (*Average Case Scenario*).

KERUSAKAN STRUKTUR BETON OUTFALL CONDENSER DAN METODE PERBAIKAN

Kerusakan Pelat Lantai

Jenis kerusakan pada lantai atas (penutup *manhole*) *outfall condenser* adalah retak dan *spalling* pada pelat lantai beton. Mutu beton pelat lantai sebagaimana diperoleh dari hasil pengujian dengan nilai rata-rata 27.07 MPa, nilainya lebih rendah dari syarat mutu beton untuk lingkungan air laut yang tidak boleh kurang dari 32 MPa. Untuk kondisi pelat lantai, pelaksanaan pengamatan hanya bisa dilakukan pada struktur *outlet* dimana jenis kerusakan yang ada berupa retak ringan hingga sedang.

Kerusakan Pelat Beton Dinding Luar

Jenis kerusakan pada dinding luar *outfall condenser* adalah retak vertikal maupun horisontal. Pelat beton dinding luar *outfall condenser* juga menunjukkan retak ringan dan adanya kerusakan terkelupasnya selimut beton (*spalling*). Mutu beton pelat beton dinding luar mempunyai nilai kuat tekan rata-rata 26.60 MPa, nilainya lebih rendah dari syarat mutu beton untuk lingkungan air laut yang tidak boleh kurang dari 32 MPa.

Kerusakan Pelat Beton Dinding Luar

Jenis kerusakan pada dinding dalam *outfall condenser* sama dengan dinding luar nya yaitu retak vertikal maupun horizontal. Pelat beton dinding dalam *outfall condenser* hanya menunjukkan retak ringan tanpa adanya kerusakan

terkelupasnya selimut beton (spalling). Mutu beton pelat beton dinding dalam mempunyai nilai kuat tekan rata-rata 28,76 MPa, nilainya lebih rendah dari syarat mutu beton untuk lingkungan air laut yang tidak boleh kurang dari 32 MPa.

Metode Perbaikan

Metode perbaikan kerusakan beton disarankan berdasarkan jenis dan bentuk kerusakan yang terjadi. Metode perbaikan kerusakan pada umumnya dibagi menjadi 2 berdasarkan kondisi lapangan, yaitu:

Perbaikan Kerusakan Retak

Beton tidak perlu dibongkar dan hanya akan dilakukan injeksi keretakan dengan menggunakan material *epoxy*. Cara perbaikan injeksi keretakan tersebut dapat di Gambarkan seperti alur pada Gambar 9.

Urutan pelaksanaan perbaikan retak pada beton adalah sebagai berikut:

1. Membersihkan permukaan yang akan di injeksi dengan sikat kawat sehingga bersih dari kotoran, minyak jamur dan kotoran lainnya. Kemudian bersihkan debu dengan *compressor/vacuum*, dan pastikan retakan dalam keadaan kering;
2. Memberi *epoxy* untuk menutup retak. Pemasangan nipel injeksi dengan bahan perekat *epoxy compound* pada setiap jarak 20 cm dan memastikan lubang nipel tepat pada beton yang retak, dengan menggunakan stick dan tekanan dengan tangan selama 3 (tiga) detik sampai nipel terpasang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.
3. Pasang jarum atau pipa tempat penginjeksian pada lubang 1, 2, 3, dan seterusnya;
4. *Epoxy injection* dilaksanakan dan kontrol injeksi dilihat dari pipa yang mengeluarkan *epoxy*. Sepanjang retakan antara 2 Nipel dipasang bahan *epoxy compound* untuk mencegah *epoxy* yang diinjeksi tidak ada yang bocor keluar. Pencampuran bahan *epoxy* dengan *paddle mixer* kecil selama 2 menit, kemudian campurkan *hardener* dengan *base* dan aduk dengan *paddle mixer* kecil selama 3 menit dengan volume sesuai kebutuhan. Pasang tabung yang berisi *hardener* pada mesin injeksi, kemudian *set compressor* dengan tekanan rendah (*low pressure*), apabila aliran *epoxy* pada selang sudah ada tanda-tanda berhenti dan ada tekanan balik pada nipel (terlihat tanda-tanda basah pada nipel), segera kunci selang agar *epoxy* tertahan didalam beton yang retak sampai *epoxy* mengeras (*final set*, 24 jam). Bekas nipel yang sudah mengeras, bisa dipotong dengan menggunakan gerinda;
5. Mengulangi Langkah *epoxy injection* hingga semua retak penuh dengan *epoxy*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Perbaikan Kerusakan Pecah

Perbaikan beton pecah meliputi pengupasan (*chipping*) permukaan beton hingga mencapai kedalaman permukaan yang keras/ kuat dan bila terlihat tulangnya terkorosi, maka pengupasan harus dilanjutkan hingga tulangan yang terkorosi tersebut terlihat seluruh keliling permukaannya

agar permukaan tulangan yang terkorosi tersebut dapat dibersihkan dan untuk selanjutnya terhadap permukaan yang telah di kupas dilakukan pembersihan kotoran debu, minyak/lemak hingga kering. Perbaikan kerusakan pengelupasan sebagaimana penjelasan diatas dapat di Gambarkan pada Gambar 12. Material *non-shrink* yang digunakan diusahakan mempunyai berat jenis ringan dan yang mempunyai waktu *setting* cepat, serta harus menjaga ketebalan minimal selimut beton sebesar 75 mm. Mengingat kondisi lingkungan yang ada adalah cukup agresif dan lembab.

Urutan pelaksanaan perbaikan retak pada beton adalah sebagai berikut:

1. *Chipping*
 - a. Melakukan *chipping* dengan *hammer drill*, sampai kedalaman 5-15 cm, atau melebihi tulangan ekisting (sampai benar-benar terlepas dari ikatan beton), atau sampai menemukan permukaan beton yang masih baik/keras;
 - b. Tulangan harus dibersihkan dengan sikat kawat atau gerinda sampai benar-benar bersih/mengkilat. Pembersihan tulangan dan pelapisan cat anti karat. Proteksi tulangan terlebih dahulu harus dibersihkan dari karat yang ada dengan memakai mesin sikat baja/ *rotary wire brush*, sampai tulangan benar2 bersih. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar bila besi tulangan bersih dari karat maka ikatan antara tulangan dengan beton nantinya benar benar baik. Jika terdapat tulangan yang telah hancur, diganti dengan besi tulangan yang baru dengan ukuran yang sama dengan tulangan eksisting, yang dipasangkan dengan cara dilas pada tulangan lama.
2. Pekerjaan Bekisting,
Setelah permukaan beton lama bersih dari segala macam kotoran debu maupun oli, pasang bekisting menggunakan bahan fiber yang kedap air (yang dibentuk mengikuti bentuk pile/ melingkar. Juga diberi busa pada setiap adanya celah bekisting agar terhindar dari kebocoran pada bekisting. Uji kebocoran bekisting, perlu dilakukan agar bekisting terbukti *watertight/ leak proof*, serta membuat beton ekisting saturated (jenuh air), agar kandungan air pada material repair tidak berkurang, yang bisa mengakibatkan keretakan plastis.
3. Pengecoran/*Grouting*

Untuk melaksanakan pekerjaan *grouting* ini, maka haruslah dibuat lubang inlet (untuk aliran masuk material *grouting*). Lubang ini selain untuk *inlet* juga berfungsi sebagai *outlet* yang bermanfaat sebagai pengalir udara di dalam bekisting, sehingga mencegah terjadinya *air trapped* (udara terjebak) yang bisa mengganggu kepadatan beton baru. Kemudian, setelah air di dalam bekisting (sisa uji kebocoran bekisting) dibuang lewat lubang kontrol air seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Segera adonan material yang telah homogen, dimasukkan ke dalam tabung *grouting*, dan lakukan *pumping*, dengan tekanan 2 sampai 3 bar. Lakukan kontrol terhadap udara yang terjebak dengan

memukul mukul bagian bawah bekisting dengan palu karet.

KESIMPULAN

Kesimpulan studi ini adalah sebagai berikut:

1. Inspeksi visual: retak yang terjadi pada elemen struktur *outfall condenser* terutama disebabkan belum memadainya kualitas pekerjaan beton saat masa konstruksi dan bukan karena pengaruh kelebihan beban. Retak pada *outfall condenser* pada umumnya dapat dimasukkan dalam kategori ringan dan hanya beberapa titik yang sudah masuk kategori berat karena tulangnya sudah dalam keadaan berkarat dan terbuka.
2. Pengukuran kelurusan dan elevasi *outfall condenser*: hasil pengukuran tidak mengindikasikan adanya penurunan pada struktur Outfall Condensor yang diteliti. Dari as-built drawing diketahui bahwa, struktur Outfall Condensor menggunakan tiang pancang dan menumpu pada tanah keras sehingga kemungkinan terjadi penurunan relatif sangat kecil.
3. Hasil *assessment destructive* maupun *non-destructive testing* menunjukkan kekuatan beton sudah di atas mutu yang direncanakan sebesar 21 MPa, namun belum memenuhi syarat mutu beton untuk lingkungan air laut.
4. Perhitungan kekuatan elemen struktur *outfall condenser* dengan memperhitungkan efek korosi menggunakan skenario *average case* menunjukkan pada tahun 2020 kekuatan *outfall condenser* berkurang menjadi sebesar 91% dari kekuatan awal; selanjutnya pada tahun 2025 berubah menjadi sebesar 82%, dan pada tahun 2030 berubah menjadi sebesar 74% dari kekuatan awal. Hasil tersebut sesuai dengan kondisi lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pengabdian masyarakat ini didukung oleh PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Sumatera Bagian Selatan Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C805-85 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. ASTM International ASTM (American Society for Testing and Materials).
- ASTM. (2009). *ASTM C597-83 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International ASTM (American Society for Testing and Materials).
- Badan Standar Nasional. (2013). *SNI 03-2847-2013 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Badan Standardisasi Nasional.