

## RE-ASSESMEN KELAYAKAN OPERASI DAN PREDIKSI UMUR SISA STRUKTUR TRAIN LOADING STATION 103

P. D. Atos<sup>1\*</sup>, I. Yani<sup>2</sup> dan A. P. Usman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Palembang

<sup>2</sup>Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang

<sup>3</sup>Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

\*Corresponding author e-mail: [atosprajadilla@gmail.com](mailto:atosprajadilla@gmail.com)

**ABSTRAK:** *Train Loading Station 103 (TLS103)* adalah fasilitas pemuatan batubara yang beroperasi sejak 1997 dengan target pemuatan 26.065 ton per hari. *Silo* berkapasitas 1.000 ton digunakan hanya hingga 80% secara operasional, dan sistem bekerja 24 jam untuk memuat rangkaian gerbong. Sebagian struktur *silo* telah mengalami deformasi plastis dan retak memanjang pada *shell*, yang sebelumnya telah diperbaiki. Kondisi ini berpotensi menurunkan keandalan dan mengganggu produktivitas. Penelitian ini bertujuan menilai kondisi teknis konstruksi dan pondasi TLS103 di Banko Barat untuk menentukan sisa umur operasinya. Metode yang digunakan meliputi penggambaran ulang, pengukuran geometri, simulasi pembebatan statis, pengujian material (NDT), *hammer test* beton, analisis umur lelah, dan evaluasi *fitness for service*. Hasil analisis menunjukkan struktur *silo* dan pondasi masih aman, dengan tegangan *von Mises* sebesar 141 MPa yang masih berada di bawah *yield strength* material. NDT menemukan penipisan ketebalan baja sekitar 1,5 mm akibat *sand blasting*, namun belum berpengaruh signifikan terhadap integritas struktur. Analisis fatigue menunjukkan kerusakan kumulatif 32,2% setelah 25 tahun operasi. Prediksi sisa umur tercatat 17,45 tahun atau sekitar 14.280 siklus. Evaluasi FFS menyimpulkan TLS103 masih layak beroperasi dengan syarat perawatan rutin tetap dilakukan.

Kata Kunci: *Train loading station, deformasi plastis, non-destructive testing, fatigue life, fitness for service*

**ABSTRACT:** *Train Loading Station 103 (TLS103)* is a coal-loading facility operating since 1997 with a capacity of 26,065 tons per day. Its 1,000-ton silo is filled up to 80% for operational safety and supports continuous 24-hour loading of rail wagons. After decades of use, parts of the silo structure have shown plastic deformation and longitudinal cracking, which have been repaired but still pose potential risks to operational reliability. This study conducts a technical assessment of the TLS103 structure and foundation at Banko Barat, Tanjung Enim, to evaluate current integrity and estimate remaining service life. The methods used include re-drawing, geometric measurements, static load simulation, non-destructive testing (NDT), concrete hammer testing, fatigue analysis, and a fitness-for-service (FFS) evaluation. Results show that the silo and foundation remain in a safe condition, with a von Mises stress of 141 MPa, still below the material's yield strength. NDT detected approximately 1.5 mm of steel thickness loss from sand blasting, but this has not significantly affected structural strength. Fatigue analysis indicates 32.2% cumulative damage after 25 years of operation. The predicted remaining life is 17.45 years, equivalent to about 14,280 cycles. The FFS assessment confirms TLS103 is fit for continued operation with consistent routine maintenance.

Keywords: *Train loading station, plastic deformation, non-destructive testing, fatigue life, fitness for service*

### 1 Pendahuluan

*Train Loading Station (TLS)* berperan penting dalam pemuatan batubara, sehingga integritas struktur dan pondasinya harus terjaga. Seiring usia dan beban berulang, struktur dapat mengalami deformasi dan retak, seperti pada TLS103 yang beroperasi sejak 1997. Kondisi ini menuntut

evaluasi menyeluruh untuk memastikan keamanan dan keandalan operasional.

Kajian terdahulu mengenai evaluasi struktur industri banyak menggunakan inspeksi visual, pengukuran geometri, serta pengujian NDT seperti *ultrasonic thickness, metallography*, dan *hammer test* beton. Analisis berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) juga digunakan

secara luas untuk menilai distribusi tegangan, lendutan, perilaku dinamis, dan umur layan struktur [6]. Pendekatan gabungan ini terbukti efektif dalam mengidentifikasi kerusakan dan menilai kelayakan operasi fasilitas seperti TLS.

Penelitian ini bertujuan menilai kondisi struktural dan pondasi TLS103 secara lebih akurat melalui integrasi data lapangan, hasil NDT, dan analisis numerik terbaru. Keterbaruan penelitian berada pada penilaian ulang umur sisa struktur setelah terjadinya perubahan bentuk dan material, serta penyusunan rekomendasi teknis berbasis data untuk mendukung keandalan dan keselamatan operasi TLS103 dalam jangka panjang.

## 2 Metode Penelitian

### 2.1 Assessment Procedure

Proses *assessment* TLS 103 dimulai dengan mengumpulkan data. Data yang dibutuhkan adalah kondisi desain awal dan kondisi saat ini. Pada saat ini telah terjadi beberapa perubahan dengan menambah komponen pada konstruksi selubung *silo* (*shell*), kerangka, dan beberapa tempat lainnya. Oleh karena itu data yang dikumpulkan terdiri atas 2 kelompok, yaitu data desain operasi dan data teknis kondisi lapangan.

#### 2.1.1 Data Desain dan Operasi

Data desain adalah data berdasarkan rancangan awal. Beberapa data desain awal masih dapat ditemukan. Tetapi banyak juga data awal yang sudah hilang. Selain itu, telah terdapat banyak perubahan pada struktur sehingga tim harus melakukan pengamatan di lapangan dan menggambar serta mengukur ulang untuk dilakukan kajian terhadap kondisi saat ini.

TLS 103 dilakukan penggambaran ulang menggunakan aplikasi *Inventor Autodesk*. *Re-drawing* TLS 103 dibuat sesuai dengan *drawing* konstruksi awal TLS dan disempurnakan dengan kondisi aktual lapangan berdasarkan hasil survei lapangan. Adapun hasil *drawing* dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2

#### 2.1.2 Data Desain Awal

Pada desain awal, struktur *silo* dapat dikelompokkan atas struktur primer dan struktur sekunder. Sumber pengambilan data adalah dari data *engineering drawing* dan dokumen yang tersedia di kantor PTBA. Pada Tabel 1 berikut ini adalah daftar struktur *silo*.

Tabel 1 Struktur *Silo*

Struktur Primer	Struktur Sekunder
<i>Conveyor</i>	<i>Crane structure</i>
<i>Silo</i>	<i>Liner plate</i>
<i>Overflow chute</i>	<i>Reflector</i>
<i>Hopper</i>	<i>Ring</i>
<i>Girder</i>	<i>Ring reinforce</i>
Sistem timbangan	<i>Stiffner plate</i>
Struktur baja penyangga	
Pondasi beton	



Gambar 1 Kondisi Aktual Lapangan TLS103.



Gambar 2 Hasil *Re-Drawing* TLS103.

#### 2.1.3 Data Operasi

Data operasi meliputi data pengoperasian pada:

##### (1) *Conveyor*

- (2) *Silo*
- (3) *Weight bin*
- (4) Jumlah/frekvensi kereta dan rangkaian yang lewat
- (5) Waktu/durasi pengisian
- (6) Waktu/durasi pengisian ulang batubara dalam *silo*

Pengoperasian TLS 103 dilakukan sejak 1997, adapun data operasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Data Operasi TLS103

Parameter	Nilai
Diameter <i>silo</i>	10.000 mm
Tinggi total	33.500 mm
Kapasitas desain	1.000 ton
Kapasitas operasi maks.	80% (800 ton)
Tahun konstruksi	1997

Beroperasi dengan total tiga *shift* perharinya. Dalam satu hari, TLS mampu menyalurkan batubara ke gerbong kereta sebanyak 26.000 ton.

## 2.2 Data Teknis Kondisi Lapangan

Data teknis dari lapangan adalah data yang diambil pada saat *survey* ke lokasi TLS 103. Data tersebut meliputi:

- (1) Pengamatan visual
- (2) Data perubahan geometri dan jarak
- (3) Data ketebalan lapisan pelindung struktur baja
- (4) Data kekerasan
- (5) Data mutu beton
- (6) Data *insitu metallografi*
- (7) Data *theodolite*

Pengamatan dan pengujian untuk mendapatkan data diatas dilakukan di lokasi TLS 103 untuk melakukan penilaian terhadap kondisi struktur saat ini.

### 2.2.1 Pengamatan visual

Pengamatan visual mempergunakan penglihatan mata atau kamera. Pengamatan ini adalah untuk melihat penampakan TLS 103 dari berbagai sisi, baik warna, kondisi permukaan, dan kondisi geometri yang merupakan indikasi terhadap kondisi terkini dari lokasi alat TLS 103 pada sisi yang sedang diamati.

### 2.2.2 Pengukuran geometri dan jarak

Pengukuran geometri dan jarak bertujuan untuk mengetahui apakah telah terjadi perubahan semenjak awal dibangun dibandingkan dengan keadaan sekarang. Pengukuran ini dilakukan menggunakan *laser distance meter* dan alat ukur. Setiap terjadi perubahan jarak atau geometri akan dicatat dan selanjutnya diteliti penyebab dan dampaknya terhadap keamanan struktur TLS 103.

### 2.2.3 Pengukuran ketebalan lapisan pelindung struktur baja

Pengukuran terhadap ketebalan lapisan pelindung struktur baja bertujuan untuk mengetahui adanya indikasi terjadinya deformasi plastis atau kemungkinan terjadi pengelupasan yang dapat menebakkan permukaan struktur terpapar terhadap Lingkungan yang akan menyebabkan korosi atau cacat lainnya. Adanya cacat-cacat ini akan menyebabkan terjadi penurunan keamanan konstruksi baja TLS 103. Oleh karena itu, pengujian ini penting untuk dilakukan. Pengukuran ketebalan dilakukan menggunakan *non destructive test* yaitu *ultrasonic test*.

### 2.2.4 Pengujian kekerasan

Angka kekerasan logam menunjukkan batas beban yang akan mulai dapat mendeformasi logam tersebut. Oleh karena itu, pembebanan harus dibawah beban yang ditunjukkan oleh hasil pengujian keras [3]. Data hasil pengujian keras selanjutnya dapat dikonversikan ke tegangan *ultimate* logam ( $\sigma_u$ ). Pengujian dilakukan menggunakan *Portable Hardness Tester Machine*. Metode pengujian yang dipergunakan adalah metode *Vickers* dengan menggunakan indentor piramida intan.

### 2.2.5 Pengujian mutu beton

Pengujian mutu beton dilakukan pada beton pondasi yang mendukung struktur TLS 103. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui daya dukung beton saat ini. Bilamana terjadi indikasi penurunan kekuatan beton, maka dapat segera diantisipasi dengan melakukan Tindakan-tindakan untuk menaikkan kekuatan dan melindungi dari penurunan kekuatan berkelanjutan akibat interaksi dengan lingkungan. Pengujian dilakukan menggunakan *hammer test* dimana disetiap lokasi dilakukan sebanyak 10 kali [1]. Kemudian data hasil uji diolah dan akan dijadikan rujukan

untuk merumuskan rekomendasi dalam meningkatkan kekuatan beton dan melindungi dari pengaruh lingkungan.

#### 2.2.6 Pengamatan *insitu metallografi*

*Insitu metallografi* dilakukan bertujuan untuk mengetahui apakah terjadi perubahan struktur mikro pada baja. Perubahan struktur mikro ini akan menunjukkan bahwa terjadi perubahan sifat mekanik baja dari kondisi awalnya. Sebagai contoh, kemungkinan terbentuk porositas, atau butir yang terdeformasi, atau terjadi perubahan fasa dari fasa yang seharusnya dimiliki baja sesuai spec atau standarnya. Hal ini akan menunjukkan sisa umur baja tersebut.

#### 2.3 *Static Assessment*

*Static assessment* atau penilaian statis adalah suatu kajian yang melibatkan analisis dan evaluasi struktur konstruksi baja TLS 103 terhadap gaya-gaya statik yang bekerja pada bahan tersebut. Proses ini melibatkan langkah-langkah seperti menggambar ulang struktur dalam model tiga dimensi (3D) dan melakukan simulasi analisis tegangan. Pada konteks ini, TLS 103 merujuk pada jenis atau spesifikasi konstruksi baja yang digunakan. Pertama-tama, tahap awal dari *static assessment* melibatkan *redrawing* atau menggambar ulang struktur konstruksi dalam model 3D. Dalam proses ini, elemen-elemen struktural seperti balok, kolom, dan sambungan akan direpresentasikan dalam lingkungan *virtual* yang memungkinkan pengamatan terperinci terhadap geometri dan komponen struktural. Model 3D ini menjadi dasar untuk selanjutnya melakukan simulasi dan analisis. Setelah struktur direpresentasikan dalam model 3D, langkah selanjutnya dalam *static assessment* adalah melakukan simulasi analisis tegangan. Proses ini melibatkan penerapan beban pada model dan penilaian bagaimana struktur tersebut merespons terhadap beban tersebut. *Load case* kondisi silo terisi 80%, yang merupakan simulasi situasi di mana silo, sebagai struktur penyimpanan, mencapai kapasitas sebesar 80%. Beban ini mencakup berat material yang disimpan di dalamnya dan memperhitungkan distribusi beban secara merata dalam struktur.

Hasil dari analisis tegangan ini akan memberikan informasi tentang distribusi tegangan di seluruh struktur. Pada tahap ini, perhatian utama adalah mengidentifikasi daerah-daerah kritis yang mungkin mengalami tegangan berlebih atau memasuki zona risiko kegagalan struktural.

Selain itu, hasil analisis juga memberikan informasi tentang posisi beban maksimum, yang dapat membantu dalam penyesuaian desain atau pemilihan material yang lebih tepat [4]. Analisis tegangan mencakup parameter-parameter seperti tegangan normal, tegangan geser, dan tegangan *von Mises* [6]. Tegangan normal mengukur tegangan yang sejajar dengan arah beban, tegangan geser mengukur deformasi pada bidang geser, dan tegangan *von Mises* memberikan representasi tegangan ekivalen yang memadukan efek tegangan normal dan geser [7].

#### 2.4 *Dynamic Assessment*

*Dynamic assessment* atau penilaian dinamis adalah suatu proses evaluasi yang bertujuan untuk mengkaji bagaimana fluktuasi beban dapat memengaruhi struktur TLS 103. TLS 103 adalah jenis atau spesifikasi konstruksi baja yang digunakan dalam konteks ini. Fokus Utama dari *dynamic assessment* ini adalah pada analisis kelelahan atau *fatigue*, yang mengacu pada respon struktur terhadap fluktuasi beban yang berulang-ulang [4]. Pentingnya *dynamic assessment* terletak pada pemahaman terhadap dampak fluktuasi beban pada struktur dan kemampuannya untuk menahan beban yang berubah-ubah dari waktu ke waktu. Dalam konteks ini, perhatian khusus diberikan pada analisis kelelahan karena fluktuasi beban dapat menyebabkan tegangan siklik pada material struktural, yang pada gilirannya dapat mengarah pada kegagalan material dari waktu ke waktu. Jumlah rangkaian yang lewat selama 24 jam dikali dengan gerbong yang diisi dalam 28 hari. Maka akan dapat dihitung kurva tegangan vs siklus operasi.

#### 2.5 *Assessment of Building Foundations*

Assessment terhadap pondasi bangunan sipil dilakukan dengan menghitung kekuatan pondasi untuk mendukung berat TLS 103. Berdasarkan mutu beton dan kekuatan pondasi terhadap beban *axial* dari TLS 103, maka dapat dilakukan *assessment* terhadap kekuatan pondasi saat ini. Pengujian terhadap kekuatan beton dilakukan menggunakan *hammer test* dan pengamatan visual terhadap permukaan beton. Pengamatan ini adalah terhadap kemungkinan terdapat retak, permukaan tererosi, atau terdapat lubang-lubang yang menunjukkan cacat pada permukaan beton.

## 2.6 Data Geometri dan Data Pembebanan

Data geometri adalah informasi yang menyajikan karakteristik geometris atau bentuk dari TLS 103. Data ini mencakup detail tentang dimensi, bentuk, posisi relatif, dan sifat-sifat geometris lainnya dari TLS 103.

Pada tahun 2012, terjadi proses deformasi plastis berupa robekan pada *shell* TLS 103. Oleh karena itu, PT Bukit Asam merancang *ring girder reinforcement* dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Spesifikasi *Ring Girder Reinforcement*

Parameter	Nilai
Ukuran	: H 200x 200
Material	: ST52-3
<i>Yield Strength</i> ( $\sigma_y$ )	: 355 MPa
<i>Hardness Number</i> (HB)	: 180 HB
Ukuran	: H 150 x 150
Material	: ST37-2
<i>Yield Strength</i> ( $\sigma_y$ )	: 235 MPa
<i>Hardness Number</i> (HB)	: 120 HB
<i>Endurance Limit</i>	: 160 MPa

Pembebanan pada TLS 103 didapatkan dari beban kapasitas batubara di dalam *silo*. Kondisi operasi kapasitas batubara maksimum yakni sebesar 80% sedangkan kapasitas batubara minimum sebesar 7%. Selain itu, pembebanan berasal dari komponen yang tidak berfungsi menjadi *prime structure*. Pembebanan *secondary structure* berupa *crane structure*, *liner*, *reflector*, *ring*, *stiffener*. Adapun spesifikasi *liner* dapat dilihat pada Tabel 4.

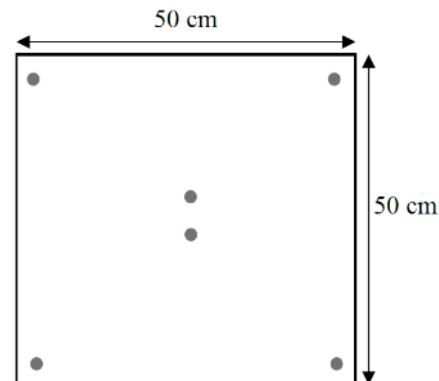
Tabel 4 Spesifikasi *Liner*

Parameter	Nilai
Ukuran	: 50x50
Material	: <i>Stainless Steel</i> 3CR12
<i>Yield Strength</i> ( $\sigma_y$ )	: 280 MPa
<i>Hardness Number</i> (HB)	: 180 HB

*Liner* dipasang pada dinding bagian dalam *silo* menggunakan metode pengelasan. Pengelasan dilakukan pada bagian *liner* ke dinding *silo* dengan *filler metal*. Adapun titik pengelasan dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



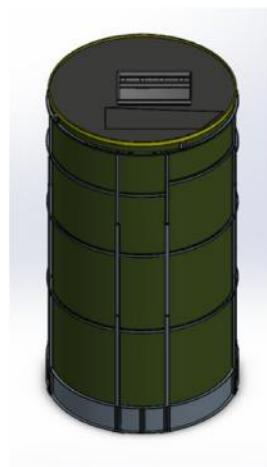
Gambar 3 Kondisi aktual lapangan



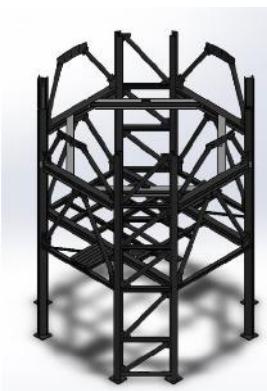
Gambar 4 Titik Pengelasan

## 2.7 *Re Drawing* dan *Simulation*

*Redrawing* merupakan proses menggambar ulang suatu objek. Setelah dibangun sejak 1997, TLS 103 belum pernah dilakukan penggambaran ulang terkait kondisi yang berada di lapangan. Oleh karena itu, *redrawing* dilakukan untuk mengambil data hasil simulasi berupa nilai *von misses*, *displacement*, dan *strain*. Proses simulasi dibagi menjadi dua, yakni struktur pondasi TLS dan *Silo* TLS. Adapun hasil *drawing* sebagai berikut.



Gambar 5 Silo TLS



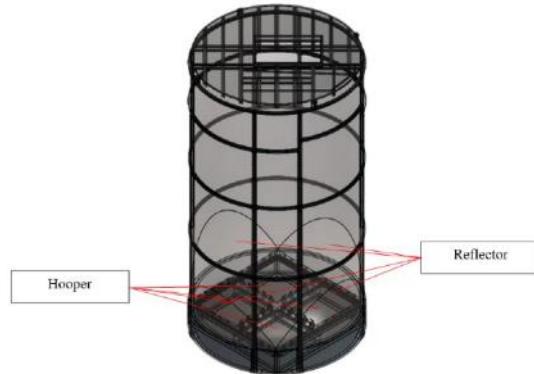
Gambar 6 Struktur Pondasi TLS

Dalam desain ini, dilakukan analisis terhadap struktur pondasi dan silo TLS 103 yang diterima sebelumnya dengan kapasitas 1000 Ton. Analisis pada silo dilakukan dalam konteks beban yang dihasilkan oleh batubara sebesar 800 Ton sesuai dengan kondisi maksimum operasi. Beban yang dihasilkan oleh batubara akan terdistribusi pada permukaan kontak dinding silo dan reflector. Selanjutnya analisis pada struktur pondasi dilakukan dalam konteks beban yang dihasilkan oleh struktur silo atas dan batubara yang ditampung.

#### 2.7.1 Simulasi Silo TLS 103

Data spesifikasi batubara mengindikasikan bahwa distribusi beban pada silo terbagi menjadi beban horizontal dan vertikal. Analisis ini bertujuan untuk memahami dampak dari beban yang dihasilkan oleh batubara tersebut pada silo yang ada, memastikan bahwa silo mampu menangani beban ini dengan aman dan sesuai dengan

kapasitas yang ditentukan. Keselamatan dan keandalan silo sangat penting dalam mengakomodasi transportasi batubara dengan kapasitas 800 Ton untuk menjaga infrastruktur TLS tetap kokoh dan berfungsi dengan baik



Gambar 7 Lokasi Hopper dan Reflector

Dalam proses analisis ini, perhatian khusus diberikan pada penempatan beban reflector dan hooper yang tergambar dalam ilustrasi Gambar 7. Tumpuan dirancang dan ditempatkan sedemikian rupa sehingga pergerakan dalam tiga dimensi (x, y, dan z) menjadi tidak mungkin. Struktur shell silo menggunakan geometri setengah lingkaran alas 6911,64 mm dan tinggi 3375,92 mm untuk reflector dengan material ST 37-2, sedangkan untuk gate hooper menggunakan geometri persegi 3070,52 mm x 3070,52 mm dengan material 3CR12. Beban yang diberikan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Beban pada silo dibagi menjadi dua, yakni beban horizontal dan beban vertikal. Perhitungan beban vertikal menggunakan Persamaan (1).

$$P_h = k \cdot \gamma \cdot s \quad (1)$$

Keterangan:

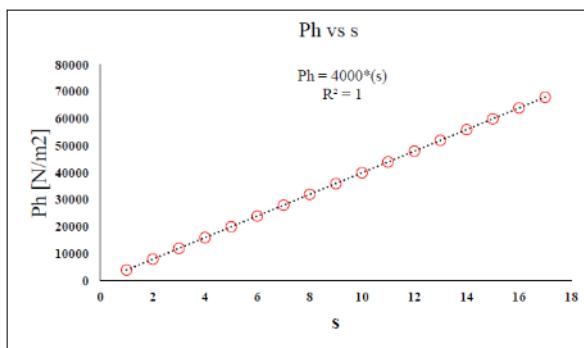
- $k$  : Coefficient lateral pressure
- $\gamma$  : Gravitational density of stored material (kN/m<sup>3</sup>)
- $s$  : Distance from the top of stored material or the barycenter of stored material cone to the calculation section (m)

Adapun data pembebanan horizontal silo dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Data Pembebanan Horizontal

No	k	$\gamma$	s	$P_h$
1	0,4	10	1	4000
2	0,4	10	2	8000
3	0,4	10	3	12000
4	0,4	10	4	16000
5	0,4	10	5	20000
6	0,4	10	6	24000
7	0,4	10	7	28000
8	0,4	10	8	32000
9	0,4	10	9	36000
10	0,4	10	10	40000
11	0,4	10	11	44000
12	0,4	10	12	48000
13	0,4	10	13	52000
14	0,4	10	14	56000
15	0,4	10	15	60000
16	0,4	10	16	64000
17	0,4	10	17	68000

Berdasarkan hasil data pembebangan horizontal *silo*, didapatkan grafik pembebangan berdasarkan ketinggian dari *top plane to calculation section* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik Pembebangan Horizontal Silo

Selanjutnya beban vertikal pada *silo* diberikan berdasarkan ketinggian. Perhitungan beban vertikal menggunakan Persamaan (2).

$$P_v = \gamma \cdot s \quad (2)$$

Keterangan:

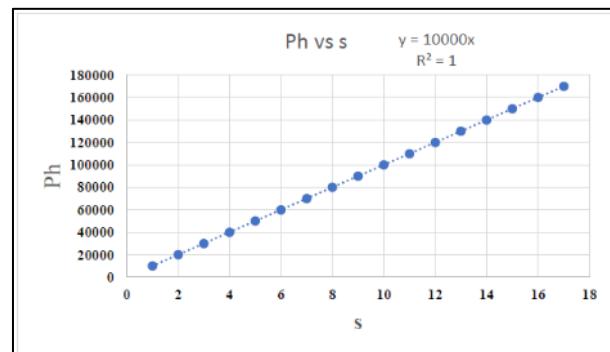
- $\gamma$  : Gravitational density of stored material ( $\text{kN/m}^3$ )  
 $s$  : Distance from the top of stored material or the barycenter of stored material cone to the calculation section (m)

Adapun data pembebangan vertikal *silo* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Data Pembebangan Vertikal

No	k	$\gamma$	s	$P_h$
1	10	1	10	1
2	10	2	20	2
3	10	3	30	3
4	10	4	40	4
5	10	5	50	5
6	10	6	60	6
7	10	7	70	7
8	10	8	80	8
9	10	9	90	9
10	10	10	100	10
11	10	11	110	11
12	10	12	120	12
13	10	13	130	13
14	10	14	140	14
15	10	15	150	15
16	10	16	160	16
17	10	17	170	17

Berdasarkan hasil data pembebangan vertikal *silo*, didapatkan grafik pembebangan berdasarkan ketinggian dari *top plane to calculation section* dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Grafik Pembebangan Vertikal Silo

### 3 Hasil dan Pembahasan

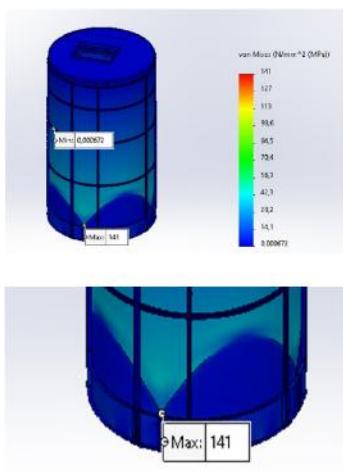
Rekapitulasi hasil analisis dapat dirangkum dalam **Error! Reference source not found..**

Tabel 7 Rekapitulasi Hasil Simulasi Silo

Parameter	Kriteria	Posisi	Nilai	Remark
Tegangan <i>von mises</i>	$\sigma_{vm} < \sigma_y$	Reflector	141 MPa	Aman

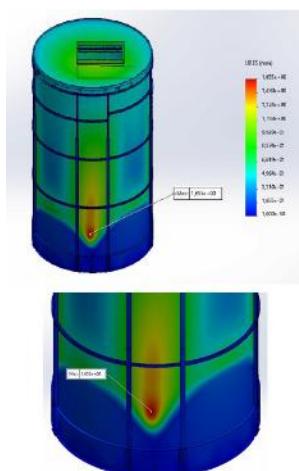
Lendutan maksimum	$\delta < L/360$	Shell	1,655 mm	Aman
Regangan %	$\epsilon < 0,02$	Reflector	0,0005892	Aman

Hasil analisis pembebatan mengungkapkan bahwa tegangan *Von Mises* tertinggi mencapai 141 MPa, terletak pada sisi *shell reflector* sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Nilai tegangan ini aman karena berada dibawah batas tegangan *yield* material *shell reflector*, yang sebesar 280 MPa untuk material ST 37-2.



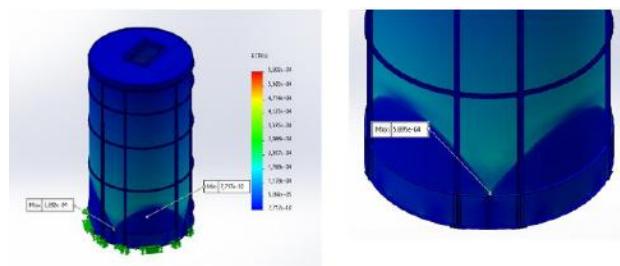
Gambar 10 Tegangan *Von Mises* Silo

Selanjutnya pada analisis lendutan/perpindahan, seperti terlihat pada Gambar 11, lendutan maksimum terjadi pada *shell silo* sebesar 1,655 mm. Nilai ini masih dikategorikan aman, karena nilai ini memenuhi syarat  $\delta < L/360$ .



Gambar 11 Lendutan pada Silo

Pada analisis simulasi silo, didapatkan nilai ESTRN sebesar 0,0005892 terlihat pada Gambar 12. Nilai ini masih tergolong aman dikarenakan memenuhi syarat  $\epsilon < 0,02 \%$ .



Gambar 12 Regangan yang terjadi pada Silo

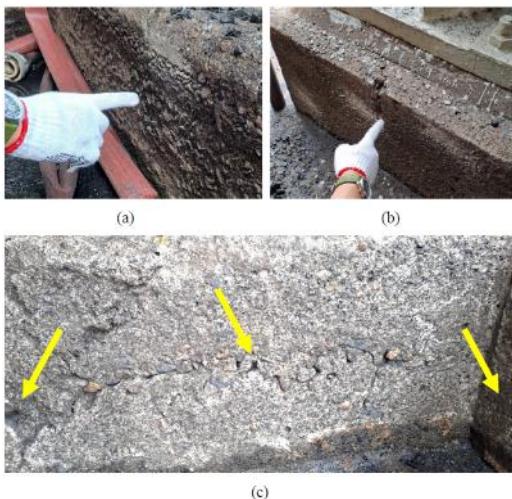
### 3.1 Pengukuran di lapangan

Pengukuran geometri di lapangan TLS 103 dilakukan menggunakan *Laser Distance Sensor* (LDS) dan *Theodolite*. Hasilnya menunjukkan bahwa kondisi geometri masih sesuai dengan kondisi konstruksi pada *engineering drawing* awal.

Pengujian teknis dilakukan menggunakan metode *Non-Destructive Testing* (NDT), termasuk *visual inspection*, *insitu metalography*, dan *ultrasonic thickness test*. Hasil *insitu metalography* menunjukkan struktur baja masih dalam kondisi baik. Pengujian *thickness* pada *main beam* dan *suspension beam* juga memperlihatkan ketebalan yang memenuhi standar namun telah terjadi penipisan sekitar 1,5 mm yang diduga akibat proses *sand blasting* yang dilakukan pada saat *recoating*.

### 3.2 Hammer Test

Pengujian kekuatan beton dilakukan dengan *hammer test* dengan sudut tembak alat pada posisi A dan posisi B mengacu kepada SNI 03-4430-1997 [1] serta PBI 1971 [2]. Sebagaimana pengecekan visual seperti terlihat pada Gambar 13 dan pengujian yang telah dilakukan, hasilnya menunjukkan bahwa struktur beton penyangga kolom, beton pondasi atas, dan beton pengikat/*sloof* masih memiliki kekuatan yang memadai (diatas 80% dari kekuatan syarat) untuk memikul beban dengan mutu beton K300.

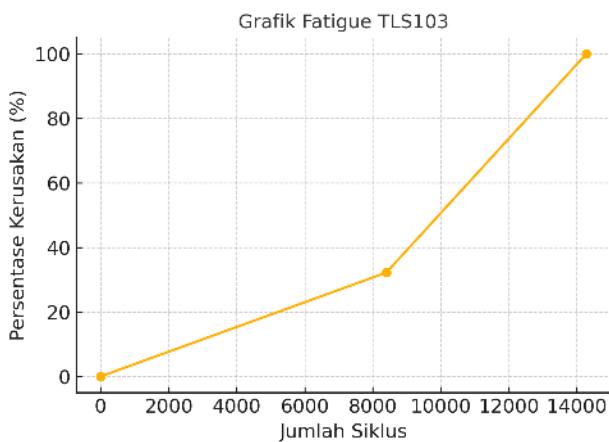


Gambar 13 Pengamatan visual terhadap permukaan beton (a) permukaan beton yang telah mengalami erosi (b) lubang yang terbentuk di permukaan beton (c) retak memanjang di permukaan beton

### 3.3 Life Assessment

Hasil simulasi *static assessment* menunjukkan bahwa silo TLS 103 berada di bawah *Endurance Limit Material* ST 37-2, yaitu 160 MPa dimana tegangan *Von Mises* maksimum yang terjadi 141 MPa.

Grafik pada Gambar 14, menunjukkan nilai siklus yang terjadi dalam sehari pada TLS 103. Hingga saat ini sejak dioperasikan dari tahun 1997, TLS 103 telah mengalami 8064 siklus dengan kapasitas ekstrim (maksimum) 26.065 Ton perhari atau 8.757.840 ton pertahun.



Gambar 14 Siklus *Loading* dan *Unloading* Batubara pada TLS103.

Pada simulasi *fatigue assessment*, dilakukan analisis terhadap *fatigue life* dari TLS 103 diperoleh hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 15:



Gambar 15 *Damage (%)* terhadap umur (Tahun) TLS 103.

Berdasarkan hasil simulasi fatik didapatkan bahwa kondisi struktur TLS 103 secara keseluruhan telah mengalami kerusakan sebesar 32,2 % pada 25 tahun atau setelah 8.400 siklus. Diprediksi struktur TLS 103 akan mengalami kerusakan *catastrophic* 100 % pada 17,45 tahun mendatang atau 14.280 siklus.

### 3.4 Fitness for Service (FFS)

Pada pengujian Fitness for Service (FFS), dilakukan evaluasi terhadap keandalan struktur. Berdasarkan hasil FFS, dapat disimpulkan bahwa TLS 103 masih dapat beroperasi secara aman dengan catatan perawatan rutin.

## 4 Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 141 MPa, masih jauh di bawah *yield strength* material ST 37-2 sebesar 235 MPa. Hal ini membuktikan bahwa struktur *silo* masih dalam batas aman. Lendutan maksimum yang terukur hanya 1,655 mm, berada jauh di bawah batas L/360. Hasil *hammer test* beton menunjukkan bahwa pondasi masih memiliki mutu di atas K-300. Pengujian NDT mengungkapkan adanya penipisan ketebalan baja sekitar 1,5 mm akibat proses *sand blasting*, namun kondisi ini belum signifikan memengaruhi kekuatan struktur. Analisis *fatigue life* menunjukkan bahwa struktur telah mengalami 32,2% kerusakan kumulatif setelah 25 tahun, dengan prediksi sisa umur 17,45 tahun atau setara 14.280 siklus. FFS menegaskan

bahwa TLS103 masih aman beroperasi dengan catatan dilakukan perawatan rutin.

Berdasarkan hasil penelitian, TLS103 masih dalam kondisi layak operasi. Analisis teknis menunjukkan bahwa tegangan, regangan, dan lendutan masih berada dalam batas aman. Analisis *fatigue life* memperkirakan sisa umur operasi 17,45 tahun dengan syarat perawatan rutin. Rekomendasi teknis yang harus dilakukan mencakup perbaikan pondasi bawah, inspeksi berkala pada konstruksi baja, mitigasi korosi pada *liner* dan *shell silo*, serta pengawasan khusus pada *beam load cell* yang berpotensi gagal lebih awal.

### **Ucapan Terima Kasih**

Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada tim dari Universitas Sriwijaya atas kerja sama dan dukungan mereka dalam penelitian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada PT Bukit Asam Tbk atas dukungan mereka dalam penelitian ini dengan menyediakan fasilitas dan peralatan yang diperlukan.

### **Daftar Pustaka**

- [1] SNI 03-4430-1997, Metode Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Alat Uji Palu Beton.
- [2] PBI 1971, Peraturan Beton Bertulang Indonesia.
- [3] ASTM E8/E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- [4] BS 7608:1993, *Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures*.
- [5] Fan, Junwei, Shijiao Yang, Bo Deng, Bing Sun, and Taoying Liu. (2023). "A Comparison of Load Distribution Methods at the Node and Internal Force Analysis of the Lattice Beam Based on the Winkler Foundation Model" *Buildings* 13, no. 7: 1731. <https://doi.org/10.3390/buildings13071731>
- [6] Kaveh, A. (2014) *Computational structural analysis and finite element methods*, *Computational Structural Analysis and Finite Element Methods*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02964-1>.
- [7] Timoshenko, S. (1941) *Strength of materials*. 2nd edn. D. Van Nostrand Company, Inc. [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(41\)90378-2](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(41)90378-2).