

EVALUASI DAN PERKUATAN BETON BERTULANG STRUKTUR SILO KERUCUT

Moh Fadhlan Rosyidi^{1*}, Arsyad Susanto¹, Kohar Yudoprasetyo¹, dan Mohammad Akbar Alrasyidi¹

¹ Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*E-mail Corresponding: fadhlanrosyidi@its.ac.id

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mendalami proses evaluasi perkuatan pada struktur kerucut silo yang mengalami kerusakan, dengan pendekatan teknis terhadap analisis perbaikan struktur. Fokus utama adalah pada silo berbentuk melingkar yang berbahan beton dengan sistem hopper menggunakan kerucut beton. Penilaian terhadap kualitas material dan kondisi struktur dilakukan melalui berbagai metode teknis, termasuk survei visual, pengujian non-destruktif seperti hammer test, *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) test, dan rebar locator, serta pengujian destruktif berupa pengambilan sampel beton untuk pengujian kekuatan tekan di laboratorium. Analisis kapasitas struktur digunakan untuk menentukan properti material eksisting, yang menjadi dasar dalam simulasi teknis menggunakan metode elemen hingga. Struktur silo dimodelkan beserta beban dan pengaruh peningkatan suhu secara berkala yang mempengaruhi untuk mengevaluasi kapasitas tahanan momen dan risiko deformasi. Berdasarkan hasil analisis, ditemukan perlunya perkuatan tambahan pada struktur silo kerucut menggunakan rangka baja profil yang dipasang tegak lurus terhadap area retak struktur pelat silo kerucut sehingga gaya momen yang terjadi menyebar secara merata pada rangka baja profil tersebut menghasilkan gaya momen pada pelat silo kerucut berkurang sebesar 57%.

Katakunci: Kerucut Silo; Penilaian; Perkuatan; Peningkatan Suhu; Struktur Silo

Abstract: *This study aims to explore the process of evaluating reinforcement in damaged silo cone structures, using a technical approach to structural repair analysis. The main focus is on circular concrete silos with a concrete cone hopper system. The assessment of material quality and structural condition is carried out through various technical methods, including visual surveys, non-destructive testing such as hammer tests, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) tests, and rebar locators, as well as destructive testing in the form of concrete sampling for compressive strength testing in the laboratory. Structural capacity analysis was used to determine the properties of existing materials, which formed the basis for technical simulations using the finite element method. The silo structure was modeled along with loads and the effects of periodic temperature increases that affect the evaluation of moment resistance capacity and the risk of deformation. Based on the analysis results, it was found that additional reinforcement was needed on the cone silo structure using a profile steel frame installed perpendicular to the cracked area of the cone silo plate structure so that the moment force that occurred was spread evenly on the profile steel frame resulting in the moment force on the cone silo plate being reduced by 57%.*

Keywords: *Silo Cone; Assessment; Reinforcement; Steel Profile; Silo Structure*

PENDAHULUAN

Silo Kerucut banyak digunakan dalam berbagai industri untuk menyimpan berbagai macam material curah. Desain yang digunakan untuk silo juga sangat bervariasi (Rotter, 2009). Dalam beberapa industri, silo besar digunakan untuk beberapa bahan curah tertentu dan setiap silo harus dirancang secara individual untuk kondisi khusus (Maraveas, 2020). Hal ini untuk menghindari kerusakan silo dari perbedaan material curah yang ditampung dalam silo. Masalah yang dihadapi silo secara umum diakibatkan pengaruh dari properti material curah, yang memberikan efek pada tulangan baja (Sassine et al., 2018). Tantangan tambahan tersebut meliputi keterbatasan kode desain, desain yang buruk, dan kegagalan akibat pemuaian serta pembongkaran berkala ketika operasional bekerja pada silo. Skenario pemuaian dan pembongkaran utama sangat dipengaruhi geometri hopper, kondisi pengisian dan pembuangan, pemuaian akibat termal, peralatan internal dan eksternal, tekanan akibat pemuaian butiran, dan efek tekanan lainnya dari material curah. Pada kondisi silo yang memburuk, ketika beton dapat mengakibatkan kegagalan struktural, sehingga tulangan baja

akan menanggung beban tarik yang lebih signifikan untuk mempertahankan stabilitas seluruh struktur (Maj, 2017).

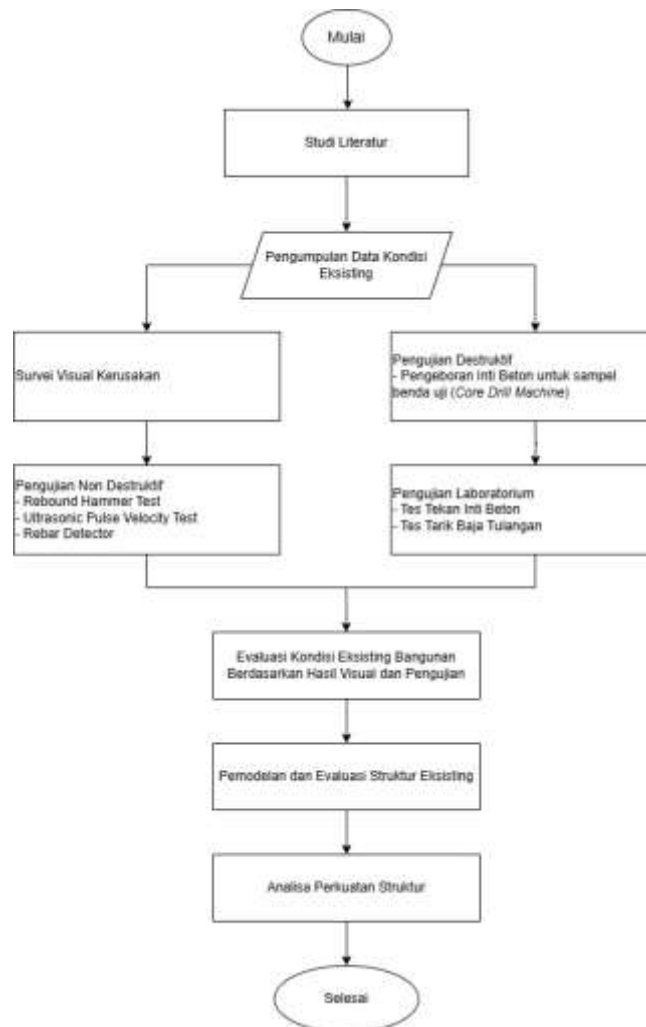
Namun, karena kemampuan beton untuk menahan tegangan relatif terbatas, beton akan mengalami keretakan saat terkena gaya tarik yang signifikan (Saleem et al., 2018). Selama pengoperasian, silo tertentu dapat mengalami pembentukan retakan baik pada arah horizontal maupun vertikal pada dinding dan kerucut silo. Retakan ini terjadi karena tekanan yang meluas oleh material yang disimpan di dalam silo, dan lebarnya melebihi batas yang ditentukan dalam desain (Khalil et al., 2022). Selain itu, dinding dan kerucut silo dapat mengalami masalah seperti beton terkelupas, tulangan yang terbuka, dan tulangan terlepas (Boyke, 2024).

Tujuan dari evaluasi struktur silo kerucut ini merupakan studi kasus terhadap Silo 5 Pabrik Semen Tuban untuk menilai kondisi struktur saat ini dan kekuatan material yang ada, serta untuk menilai kapasitas elemen struktur silo semen berdasarkan kondisi beban rencana yang ada sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Serta menganalisa rekomendasi perbaikan dan perkuatan yang dibutuhkan agar bangunan silo memiliki umur operasional sesuai kondisi layan yang direncanakan.

Dalam makalah ini, menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga SAP2000, sebuah model analisis struktur untuk silo kerucut beton bertulang diusulkan. Dibandingkan dengan kasus nyata, nilai yang diprediksi oleh model dibandingkan dengan umur layanan silo yang sebenarnya, dan ditemukan bahwa umur yang ditunjukkan oleh metode elemen hingga sesuai dengan umur yang dirancang berdasarkan spesifikasi silo.

METODE

Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pada artikel ini evaluasi dilakukan dengan hasil survei visual, pengujian lapangan dan pemodelan struktur eksisting dengan pembebanan untuk mendapatkan gaya reaksi dibandingkan dengan kapasitas elemen. Sehingga didapatkan perkuatan untuk meningkatkan kapasitas elemen struktur eksisting

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan utama evaluasi struktur silo kerucut ini adalah untuk menilai kondisi aktual struktur, kekuatan material eksisting, serta kapasitas elemen struktur berdasarkan beban rencana sesuai regulasi yang berlaku. Penilaian dilakukan melalui pengujian destruktif dan non-destruktif pada Silo yang terdiri dari beberapa tahap berikut:

Survei Visual Kerusakan

Sebelum melakukan pengujian material tambahan, sangat penting untuk melakukan inspeksi visual pada elemen struktural yang sedang ditinjau untuk mencari tanda-tanda kerusakan. Pada saat yang sama, kondisi kerucut silo diketahui dalam keadaan buruk berdasarkan pengamatan.

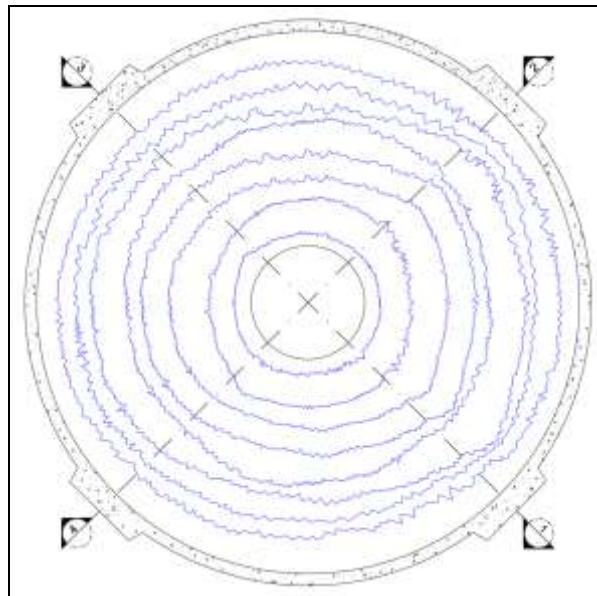


Gambar 2. Visual Kerusakan Sisi Atas Pelat Silo Kerucut



Gambar 3. Visual Kerusakan Sisi Bawah Pelat Silo Kerucut

Elemen struktur silo kerucut mengalami kerusakan. Hasil dokumentasi survei visual melalui foto (Gambar 2 dan 3) serta ilustrasi kerusakan (Gambar 4 dan 5) menunjukkan hal ini. Gambar tersebut menggambarkan banyaknya retakan yang terjadi pada permukaan atas dan bawah silo kerucut.



Gambar 4. Kerusakan Retak Pada Sisi Atas Kerucut Silo



Gambar 5. Kerusakan Retak Pada Sisi Bawah Kerucut Silo

Pengujian Non Destruktif Hammer Test dan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Test

Hammer test merupakan salah satu dari non destructive test yang bertujuan untuk mengetahui keseragaman dan kualitas kekerasan permukaan beton. Pada test ini mengandalkan besar nilai pantulan yang diberikan oleh permukaan beton yang dilakukan pengujian, dengan suatu kerja dari alat ring pegas yang ada. Alat yang dipergunakan dalam pengetesan ini adalah Hammer Type N 34, buatan Proceq Switzerland. Semakin keras permukaan beton yang di-hammer, semakin tinggi reaksi dari pantulan ring pegas tersebut, karenanya akan tercatat nilai yang lebih besar. Nilai pantulan ini sangat dipengaruhi oleh arah sudut pengetesannya, dimana nilai pantulan yang sama, akan memberikan makna yang lebih besar pada pengetesan dengan arah +90⁰ dan 0⁰. Tabel 1 merupakan korelasi rata-rata nilai rebound hammer terkoreksi terhadap kualitas kekerasan permukaan beton.

Tabel 1. Korelasi rata-rata nilai rebound hammer terkoreksi terhadap kualitas kekerasan permukaan beton

Rata-rata Rebound Terkoreksi	Kualitas Kekerasan Permukaan Beton
V > 40	Sangat Baik
30 - 40	Baik
20 - 30	Cukup

< 20	Jelek atau Terjadi Delaminasi
0	Sangat Jelek atau Terjadi Delaminasi

Tabel 2. Hasil Data *Rebound* Beton Pengujian Hammer Test Sisi Atas Silo Kerucut

Kode Pengujian	Rata-rata Rebound Terkoreksi
H-01	28
H-02	27
H-03	26
H-04	29
H-05	27
H-06	26
H-07	26
H-08	29
H-09	27
H-10	26

Tabel 3. Hasil Data *Rebound* Beton Pengujian Hammer Test Sisi Bawah Silo Kerucut

Kode Pengujian	Rata-rata Rebound Terkoreksi
H-01	29
H-02	27
H-03	27
H-04	28
H-05	26
H-06	28
H-07	29
H-08	27
H-09	26
H-10	27

Dari hasil pengujian hammer dapat dilihat pada tabel 2 dan 3, didapatkan nilai pantulan (*rebound*) dengan rentang nilai 26 – 29. Adapun nilai rata – rata *rebound* hammer hasil tes adalah sebesar 28. Sehingga kualitas kekerasan beton pada permukaan elemen struktur silo kerucut adalah Cukup dan seragam.

Pengujian kepadatan beton dengan Ultrasonic Pulse Velocity test yang berdasarkan pada ASTM C 597-02 ini bertujuan untuk memeriksa keseragaman dan kerapatan beton berdasarkan kecepatan dari gelombang ultrasonik. Kecepatan gelombang tersebut akan semakin cepat bila melalui beton yang kepadatannya cukup tinggi atau dengan kata lain memiliki kekuatan yang tinggi, begitu juga sebaliknya terhadap beton yang kepadatannya kurang. Dengan kata lain, pengujian ini untuk memprediksi kualitas kepadatan beton di mana semakin padat dapat dikatakan bahwa mutu beton masih baik.

Adapun pengukuran dilakukan dengan secara langsung (*direct – Pulse Velocity*) di mana posisi transmitter dan receiver pada posisi segaris dari benda uji maupun secara tidak langsung (*indirect – Surface Velocity*). Hasil bacaan kecepatan rambat gelombang ultrasonik (*V*, m/s) dari setiap lokasi yang diuji nantinya akan dibandingkan dengan klasifikasi hasil UPV menurut BS 1881-1986:Part 203. Tabel 4 memperlihatkan bahwa untuk beton dengan nilai cepat rambat gelombang ultrasonik, $V < 3000$ m/s dikategorikan sebagai beton dengan kualitas kurang (*poor*).

Tabel 4. Klasifikasi Kepadatan Beton dari Hasil Cepat Rambat Gelombang Pengujian UPV Menurut BS1881-1986

Kecepatan <i>V</i> (m/s)	Klasifikasi
$V < 3000$	Jelek dan Kehilangan Integritas
$3000 < V < 3500$	Cukup indikasi diduga kehilangan integritas
$3500 < V < 4000$	Baik
$V > 4000$	Sangat Baik

Tabel 5. Hasil Data Kepadatan Beton Pengujian UPV Sisi Atas Silo Kerucut

Kode Pengujian	Pulse Velocity (m/s)	Klasifikasi
U-01	2247	Jelek dan Kehilangan Integritas
U-02	2466	Jelek dan Kehilangan Integritas

Kode Pengujian	Pulse Velocity (m/s)	Klasifikasi
U-03	2519	Jelek dan Kehilangan Integritas
U-04	2268	Jelek dan Kehilangan Integritas

Tabel 6. Hasil Data Kepadatan Beton Pengujian UPV Sisi Bawah Silo Kerucut

Kode Pengujian	Pulse Velocity (m/s)	Klasifikasi
U-05	2227	Jelek dan Kehilangan Integritas
U-06	2288	Jelek dan Kehilangan Integritas
U-07	2101	Jelek dan Kehilangan Integritas
U-08	2037	Jelek dan Kehilangan Integritas

Dari pencatatan data kepadatan pada struktur silo kerucut dapat dilihat pada table 5 dan 6 maka dapat dievaluasi bahwa nilai kecepatan rambatan gelombang berkisar dari 2037 m/s s/d 2519 m/s. Sedangkan nilai rata-rata kecepatan adalah $V = 2269,13$ m/s. Sehingga berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa kepadatan beton berada dalam kondisi Jelek dan Kehilangan Integritas dengan rata-rata kepadatan material beton dalam kondisi jelek dan kehilangan integritas.

Dikarenakan adanya retakan pada struktur di lokasi maka dilakukan juga pengambilan data kedalaman retakan pada struktur

Tabel 7. Hasil Data Kedalaman Retak menggunakan UPV

Kode Pengujian	Lokasi	Kedalaman Retak (mm)
Crack 01	Sisi Atas	247
Crack 02	Sisi Atas	219
Crack 03	Sisi Atas	119
Crack 04	Sisi Atas	100
Crack 05	Sisi Bawah	252
Crack 06	Sisi Bawah	153
Crack 07	Sisi Bawah	293
Crack 08	Sisi Bawah	139
Crack 09	Sisi Bawah	157
Crack 10	Sisi Bawah	162
Crack 11	Sisi Bawah	128

Hasil pengukuran kedalaman retak dapat dilihat pada tabel 7 didapatkan rentang nilai sebesar 100 sampai 247 mm nilai tersebut merupakan retak struktural karena sudah melewati tebal selimut beton sebesar 70mm.

Rebar Detector

Meskipun sudah ada gambar desain dan gambar as-built yang digunakan untuk menilai kekuatan struktur bangunan, pengujian masih diperlukan untuk memverifikasi akurasi penilaian tersebut. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan sejauh mana konfigurasi detail penulangan, jarak antar penulangan, ketebalan penutup beton, dan diameter penulangan yang dipasang sesuai dengan data yang ada. Lokasi pengujian ditentukan secara acak. Hasil pengujian ini akan digunakan untuk menilai kapasitas elemen struktural.

Hilti PS 200 rebar locator digunakan untuk menentukan ketebalan penutup beton dan posisi penulangan pada elemen struktural. Alat ini memungkinkan pengukuran yang akurat terhadap ketebalan penutup beton, yang memungkinkan penilaian efektivitas struktur beton bertulang. Ketebalan yang diukur dapat digunakan sebagai dasar untuk menganalisis kapasitas penampang struktur.

Tabel 8. Hasil Data Pengujian Rebar Detector

	Hasil Pembacaan
Pembacaan Tulangan	Vertikal
Jarak Antar Tulangan (mm)	± 100
Jumlah Tulangan (pcs)	7
Tebal Selimut (mm)	68
Pembacaan Tulangan	Horisontal
Jarak Antar Tulangan (mm)	± 100

Jumlah Tulangan (pcs)	7
Tebal Selimut (mm)	75

Didapatkan hasil rebar detector pada tabel 8 didapatkan jarak tulangan sebesar 100 mm dan tebal selimut rata-rata 70mm.

Pengambilan Sampel Beton

Pengambilan sampel inti beton dilakukan berdasarkan metode uji ASTM C42-90 atau SNI 03-2492-2002. Ini dikategorikan sebagai uji destruktif di mana sampel diambil menggunakan bor inti dengan mata bor berdiameter 4 inci untuk memperoleh sampel inti beton dengan diameter 94 mm. Panjang sampel silinder beton berkisar antara 1,9 hingga 2,1 kali diameter. Jika panjang sampel melebihi 2,1 kali diameter, panjang sampel harus dikurangi, sedangkan jika berdasarkan kondisi di lapangan, panjang yang sama atau kurang dari 1,75 kali diameter harus dikalikan dengan faktor koreksi kekuatan tekan. Empat silinder beton diambil dari struktur silo kerucut dapat dilihat pada Gambar 6.

Setelah itu, sampel bor inti beton akan dibuat menjadi spesimen uji kekuatan tekan silinder. Sampel, yang berupa silinder hasil bor inti, kemudian dibawa ke laboratorium untuk diuji kekuatan tekan beton. Demikian pula, jika sampel baja tulangan diambil, sampel tersebut akan digunakan sebagai spesimen uji baja tulangan.



Gambar 6. Sampel Beton hasil pengambilan pada struktur silo kerucut

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium, didapatkan hasil kuat tekan dari benda uji silinder pada elemen struktur silo kerucut adalah: $f_c' \text{ min} = 12,02 \text{ Mpa}$, $f_c' \text{ max} = 14,90 \text{ Mpa}$, $f_c' \text{ average} = 13,44 \text{ Mpa}$. Hal ini berkaitan dengan nilai kepadatan pada hasil pengujian UPV yang menyimpulkan bahwa kondisi kepadatan beton eksisting dalam keadaan Cukup yang memiliki potensi penurunan mutu beton (Khoury, 1992).

Model Dan Evaluasi Struktur

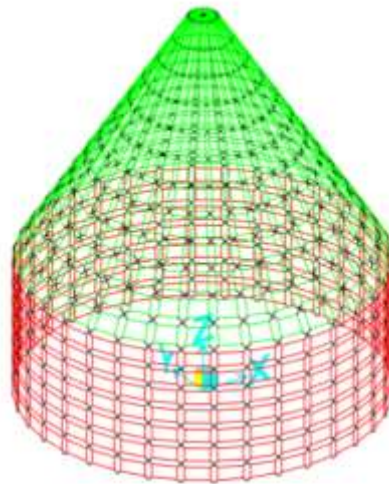
Evaluasi struktural didasarkan pada kondisi kerusakan pada area pelat silo kerucut dan hasil pengujian lapangan dengan menggunakan program bantu sebagai media pemodelan struktur secara 3 dimensi berdasarkan gambar struktural eksisting bangunan silo kerucut dapat dilihat pada gambar 7.

Beban yang bekerja pada silo kerucut di hitung dengan metode analisa beban Janssen dan Reimbert dalam menghitung tekanan statis akibat beban yang bekerja di dalam silo kerucut. Data pembebanan dapat dilihat pada tabel 9.

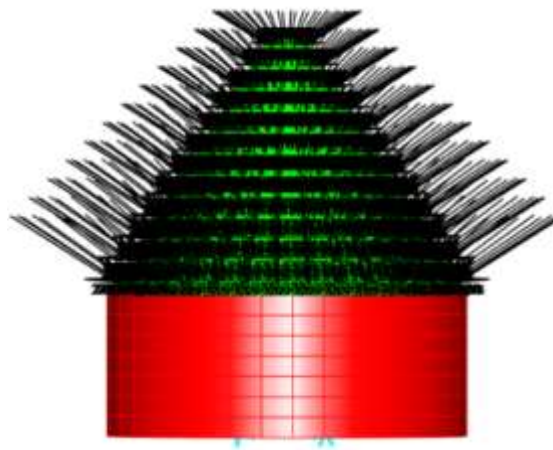
Tabel 9. Data Input Beban dan Material Curah di Dalam Silo kerucut

Data	Beban	Satuan
Kapasitas tertampung	10000	T
Tekanan statis vertikal (q.des max)	26,88	T/m ²
Tekanan statis horizontal (p.des max)	7,92	T/m ²

Gaya friksi material (v.des max)	74,83	T/m
----------------------------------	-------	-----



Gambar 7. Pemodelan Struktur Silo Kerucut



Gambar 8. Ilustrasi Pembebanan Tekan Statis Vertikal pada Silo Kerucut

Dalam metode Janssen dan Reimbert, tekanan yang bekerja dihitung sebagai tekanan statis, dimana tekanan vertical (q) dihitung sebagai dasar dengan pengaruh massa jenis (γ), diameter hidrolis (R), dan kedalaman material (Y) sehingga di dapatkan tekanan yang mewakili kapasitas material terisi dalam satu silo (Fintel, 1985). Gaya tekanan statis inilah yang akan menjadi gaya yang bekerja pada struktur pelat silo kerucut. Pada gambar 8 merupakan pemodelan pembebanan pada software SAP 2000.

$$q = \frac{\gamma R}{\mu k} [1 - e^{-\mu k Y/R}] \dots\dots\dots \text{pers.1}$$

Pada kondisi khusus ketika pengosongan dan pengisian berlangsung, terjadi peningkatan yang akan mempengaruhi kondisi tekanan statis sehingga faktor penguatan dibutuhkan sebagai faktor perbesaran ketika tekanan dinamis berlangsung (Hein et al., 2012). Kondisi aliran material selama pengisian dan pengosongan akan menjadi pertimbangan yang mempengaruhi beban silo.

Dalam penerapan pengaruh suhu pada bangunan, pengaruh suhu lebih banyak diabaikan. Namun dalam pengaruh pada bangunan silo, pengaruh suhu material tersimpan di sesuaikan dengan suhu umum yang terjadi di lingkungan bangunan (Chuc et al., 2018). Perhitungan temperatur sendiri di tentukan dengan mempertimbangkan faktor distribusi panas terhadap ketebalan dinding beton.

Perubahan suhu menyebabkan dinding silo berkontraksi dalam kondisi pemampatan material yang disimpan mengakibatkan tekanan internal pada dinding cone, yang kemudian timbul tegangan yang menyebabkan regangan pada dinding. Sebagaimana pada analisa efek perubahan suhu oleh Theimer (Orosz,

1977), dirumuskan tekanan akibat perubahan suhu (Ph) berhubungan dengan pengaruh regangan dan tegangan material beton dalam menerima perubahan suhu jangka pendek berkala.

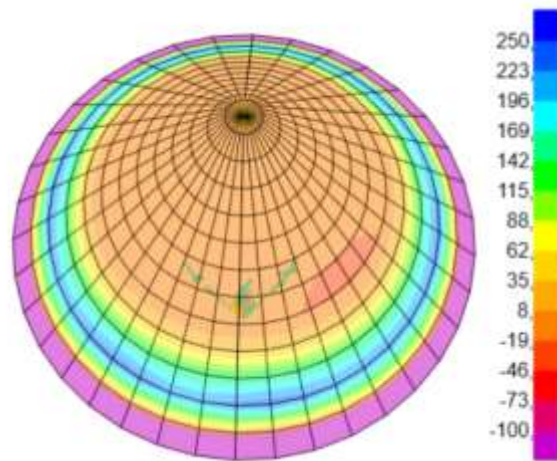
$$Ph, 0 = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot Df}{R + \frac{Df}{Cg}} \dots\dots\dots pers.2$$

dimana

- Ph = Peningkatan tekanan pada dinding akibat perubahan suhu thermal
- α = Koefisien muai dinding beton akibat perubahan suhu
- Δt = Variasi temperatur yang terjadi pada dinding
- Df = Koefisien defleksi kekakuan akibat pemuaiian beton (regangan)
- R = Radius imaginary sebagai silinder beton
- Cg = Koefisien regangan beton

Hasil Evaluasi Struktur

Melalui pemodelan struktur pada area pelat silo kerucut, menunjukkan terjadi pemusatan tekanan pada pelat silo kerucut sehingga momen kapasitas dari tulangan yang terpasang pada pelat silo kerucut tidak dapat menahan momen yang terjadi dan mengakibatkan keretakan terjadi pada pelat silo kerucut.



Gambar 9. Distribusi Reaksi Momen Pelat pada Kondisi Operasional

Tabel 10. Rekapitulasi Reaksi Momen pada Pelat Silo Kerucut

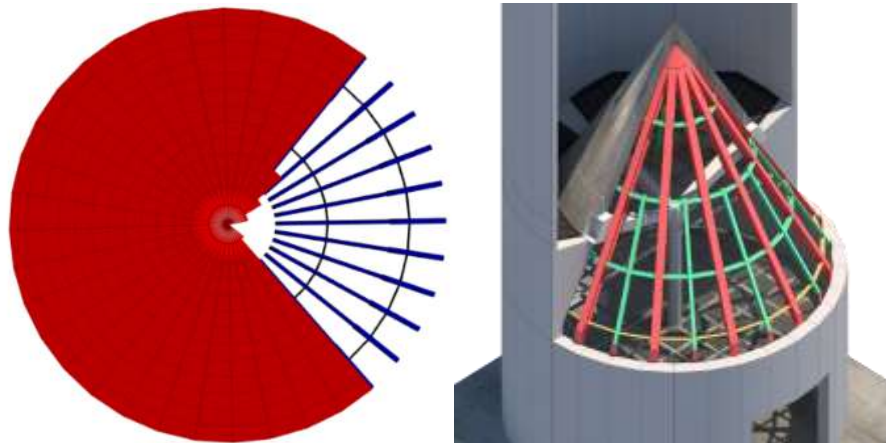
Tebal mm	Posisi	Sumbu	MU kN.m	ϕM_n kN.m	Kontrol Mu < ϕM_n	Rasio n < 1
400	Tumpuan	Y	242,39	141,99	Check	1,71
		X	97,37	102,20	OK	0,95
	Lapangan	Y	149,03	141,99	Check	1,05
		X	51,99	102,20	OK	0,51

Pada Gambar 9. menggambarkan distribusi momen ultimit yang terjadi akibat dari kondisi operasional dengan warna biru menggambarkan area dengan momen ultimit (Mu) melebihi dari batas kemampuan tulangan terpasang. Dengan kondisi tersebut, distribusi momen memiliki kesamaan dengan kerusakan retak yang terjadi sebagaimana hasil pengamatan secara langsung pada bangunan struktur pelat silo kerucut. Tabel 10 memperlihatkan nilai momen dan kapasitas pelat dengan rasio lebih dari satu.

Melalui hasil tersebut, dilakukan perkuatan pada pelat silo kerucut dengan menambahkan elemen perkuatan sebagai tambahan struktur yang akan menopang pelat silo kerucut. Tujuan utama dari perkuatan dengan profil baja ini adalah untuk mengurangi momen ultimate pada pelat sehingga gaya yang terjadi

menyebar merata pada profil baja membuat gaya momen ultimate pada pelat silo kerucut menjadi berkurang sehingga kapasitas momen pelat silo kerucut masih mampu menahan gaya yang terjadi.

Mempertimbangkan karakteristik silo kerucut tersebut sebagai dasar tumpungan dari bangunan penyimpanan material curah seperti silo ini, maka digunakan struktur rangka baja sebagai perkuatan pelat silo kerucut. Struktur rangka baja dinilai memiliki kapasitas material tinggi dan anggaran cenderung minim sebagai metode perkuatan struktur. Gambar 10 merupakan pemodelan dan tampak atas perkuatan rangka baja pada pelat silo kerucut.



Gambar 10. Tampak Atas Struktur Perkuatan Rangka Baja pada Pelat Silo Kerucut

Tabel 11. Rekapitulasi Reaksi Momen pada Pelat Silo Kerucut Setelah Perkuatan Baja

Tebal	Posisi	Sumbu	MU	ϕM_n	Kontrol	Rasio
mm			kN.m	kN.m	$M_u < \phi M_n$	$n < 1$
400	Tumpuan	Y	139,28	141,99	OK	0,99
		X	86,54	102,20	OK	0,94
	Lapangan	Y	116,63	141,99	OK	0,88
		X	48,73	102,20	OK	0,52

Dengan indikasi retak dan spalling yang terjadi, rangka baja dapat memberikan ketahanan terhadap beban secara grafitasi sehingga kemungkinan pelat silo kerucut mengalami defleksi dapat teratasi. Struktur perkuatan digunakan sebagai perkuatan lentur sehingga momen maksimum yang terjadi akibat beban kondisi operasional sebagian akan diterima struktur rangka perkuatan baja sehingga momen yang terjadi pada pelat silo kerucut menjadi berkurang. Table 11 menunjukkan pengurangan momen ultimit pada pelat silo kerucut sehingga rasio kapasitas dengan gaya momen ultimit menjadi kurang dari satu.

KESIMPULAN

Melalui hasil evaluasi yang dilakukan baik melalui inspeksi langsung di lapangan maupun pemodelan dengan metode elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa keretakan yang terjadi memiliki karakteristik akibat kelebihan beban atau ketidaksesuaian penulangan struktur terhadap reaksi beban yang diterima. Hal ini menunjukkan bahwa elemen struktur tidak sepenuhnya mampu menahan gaya internal yang timbul, sehingga memicu terjadinya retak pada area tertentu yang menandakan adanya penurunan kapasitas elemen beton terhadap beban yang bekerja.

Dari hasil pengujian NDT dan DT diketahui mutu beton berada dalam kondisi kurang baik. Adanya perbedaan hasil pengujian antar sampel mengindikasikan kemungkinan penurunan mutu beton secara keseluruhan. Penurunan mutu ini berdampak pada menurunnya kapasitas retak beton, yang menyebabkan beton menjadi lebih rentan mengalami kerusakan saat menerima beban yang lebih besar dari kapasitas momen pada kondisi eksisting. Selain itu, struktur pelat silo kerucut yang berbentuk kerucut menyebabkan distribusi beban terpusat pada area sekitar kaki kerucut. Kondisi ini menyebabkan terjadinya bending pada area tumpuan monolit akibat beban serentak yang menekan ke bawah.

Sebagai upaya perkuatan, digunakan struktur rangka baja penopang dengan profil WF yang dipasang tegak lurus terhadap area retak struktur pelat silo kerucut. Struktur ini berfungsi untuk mengurangi dan menahan sebagian reaksi momen ultimit (M_u) akibat beban operasional yang sebelumnya hanya ditahan oleh kapasitas pelat silo kerucut. Pengurangan momen ultimit pada struktur pelat silo kerucut akibat penambahan struktur rangka baja penopang dengan profil WF adalah sebesar 57% pada tumpuan dikarenakan momen ultimit yang terjadi menyebar secara merata pada profil WF dan Pelat Silo Kerucut.

DAFTAR PUSTAKA

- Boyke, C. (2024). *Crack And Strength Assessment Of Reinforced Concrete Cone In Silo* (Vol. 6, Issue 2, pp. 1–14).
- Chuc, N. T., Le, Q. D., Thoan, P. V., & Kiet, B. A. (2018). The Effects of Insulation Thickness on Temperature Field and Evaluating Cracking in the Mass Concrete. *Electron. J. Struct. Eng*, 18(2), 128–132. <https://doi.org/10.56748/ejse.182722>
- Darujati, A., Nisumanti, S., & Amalia, G. (2023). Analisis Kuat Tekan Dan Ultrasonic Pulse Velocity (Upv Test) Pada Mutu Beton K 350 Menggunakan Beton Sisa Pengujian Sebagai Substitusi Agregat Kasar. In *Padur. J. Tek. Sipil. Univ. Warmadewa* (Vol. 12, Issue 1, pp. 30–35). <https://doi.org/10.22225/pd.12.1.5890.30-35>
- Fintel, M. (1985). *Handbook of Concrete Engineering 2nd Edition by Mark Fintel*.
- Hein, D. K., Eng, P., & Sullivan, S. (2012). CONCRETE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (CTE) AND ITS SIGNIFICANCE IN MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN. In *2012 TAC Conf. Exhib. - Transp. Innov. Oppor. TAC/ATC 2012* (Vol. 234).
- Khalil, M., Ruggieri, S., & Uva, G. (2022). Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app12063006>
- Khoury, G. A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. In *Mag. Concr. Res* (Vol. 44, Issue 161, pp. 291–309). <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.161.291>
- Maj, M. (2017). Some Causes of Reinforced Concrete Silos Failure. *Procedia Engineering*, 172, 685–691. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.081>
- Maraveas, C. (2020). Concrete silos: Failures, design issues and repair/strengthening methods. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11125675>
- Orosz, A. (1977). *Thermal Effects in Reinforced Concrete Silo*.
- Rotter, J. M. (2009). *Silo and Hopper Design for Strength*. Blackwell Pub. <https://doi.org/10.1002/9781444305449.ch3>
- Saleem, M. U., Khurshid, H., Qureshi, H. J., & Siddiqi, Z. A. (2018). A Simplified Approach for Analysis and Design of Reinforced Concrete Circular Silos and Bunkers. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12(1), 234–250. <https://doi.org/10.2174/1874836801812010234>
- Sassine, N., Donzé, F. V., Harthong, B., & Bruch, A. (2018). Thermal stress numerical study in granular packed bed storage tank. *Granular Matter*, 20(3), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0817-y>
- Yudoprasetyo, K., Tajunnisa, Y., & Anugraha, R. B. (2024). *Evaluasi Kondisi Struktur Terkini dan Rekomendasi Perkuatan pada Gedung Perkantoran di Surabaya* (Vol. 8, Issue 6).

