



Terbit *online* pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Pemanfaatan Struktur *Space Frame* pada Rangka Atap Gedung

Muhammad Afdal Syafikri^a, Igeny Dwiana Darmawan^b, Alex Kurniawandy^c

^{a,b,c} Universitas Riau, JL Bina Widya 12,5 KM, Pekanbaru 2829, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 10 November 2023

Revisi Akhir: 31 Desember 2023

Diterbitkan *Online*: 31 Desember 2023

KATA KUNCI

Space Frame, Optimasi, Batang Tarik,
Batang Tekan

KORISPONDENSI

Telepon: +6276163266

E-mail: alexkurniawandy@eng.unri.ac.id

A B S T R A C T

Gedung yang berfungsi sebagai sarana gedung pertemuan dan arena olahraga pada umumnya mempunyai bentangan rangka atap yang besar. Pada bentang atap dengan ukuran 34 m x 39 m sebagai studi kasus yang ditinjau dibutuhkan sistem struktur bentang lebar yang cocok untuk diterapkan. Oleh karena itu, teknologi struktural seperti *space frame* atau struktur baja yang kuat sering digunakan untuk mencapai bentang lebar yang diinginkan dalam bangunan tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan perancangan dimensi batang-batang *space frame* yang cocok untuk digunakan dan melihat kemampuan struktur *space frame* tersebut mampu menahan beban dengan kombinasi pembebanan. Perhitungan struktur *space frame* mengacu pada peraturan LRFD dengan SNI 1729: 2020, peraturan gempa menggunakan SNI 1726: 2019, dan pembebanan menggunakan SNI 1727: 2020. Optimasi perancangan dilakukan dengan mengecilkan dimensi batang pipa dari keadaan perancangan awal. Hasil optimasi didapatkan diameter 2,5 inci dapat dijadikan 2 inci; diameter 3 inci menjadi 2,5 inci; diameter 4 inci menjadi 3 inci; dan diameter 6 inci menjadi 5 inci. Hasil analisis menunjukkan bahwa semua diameter yang dirancang telah memenuhi syarat kekuatan batang tarik dan/atau batang tekan terhadap gaya dalam atau beban *ultimate* yang terjadi pada struktur *space frame*.

1. PENDAHULUAN

Bangunan bentang lebar merupakan bangunan yang memungkinkan penggunaan ruang bebas kolom yang selebar dan sepanjang mungkin, dimana jenis bangunan yang memiliki jarak horizontal yang besar antara dua titik penyangga atau penopang utama. Bentang lebar mengacu pada jarak horizontal dari satu sisi bangunan ke sisi lainnya tanpa adanya penyangga atau kolom penyangga tambahan di tengahnya. Ini adalah elemen penting dalam desain bangunan yang memungkinkan penciptaan ruang yang luas dan terbuka di dalamnya. Desain bangunan dengan bentang lebar biasanya memerlukan perencanaan struktural yang cermat dan teknik konstruksi yang kuat untuk mendukung beban yang besar tanpa penopang tambahan di tengah ruang. Oleh karena itu, teknologi

struktural seperti *space frame* atau struktur baja yang kuat sering digunakan untuk mencapai bentang lebar yang diinginkan dalam bangunan tersebut.

Gedung *Student Center* Universitas Riau dibangun sebagai sarana gedung pertemuan dan arena olahraga, dengan bentang atap 34 m x 39 m, berdasarkan bentang tersebut maka dibutuhkan sistem struktur bentang lebar yang cocok untuk diterapkan pada gedung ini. Sistem struktur bentang lebar yang dipilih adalah sistem struktur *space frame* (rangka ruang).

Space frame adalah suatu struktur ruang yang terdiri dari rangkaian batang-batang yang membentuk jaringan tiga dimensi untuk mendukung beban tertentu. Struktur ini terdiri dari elemen-elemen batang yang saling terhubung dalam suatu pola geometris yang membentuk ruang berjaring, seringkali dengan bentuk segi tiga, segi empat,

atau bentuk lainnya. *Space frame* sering digunakan dalam konstruksi bangunan besar seperti stadion, gedung pabrik, aula, dan fasilitas komersial lainnya. Keunggulan *space frame* termasuk kemampuannya untuk menciptakan ruang yang luas tanpa adanya kolom penyangga yang mengganggu, sehingga memberikan fleksibilitas dalam tata letak interior dan estetika yang menarik. Selain itu, *space frame* juga dikenal karena beratnya yang ringan dibandingkan dengan beberapa struktur konvensional lainnya, sehingga mengurangi beban pada fondasi.

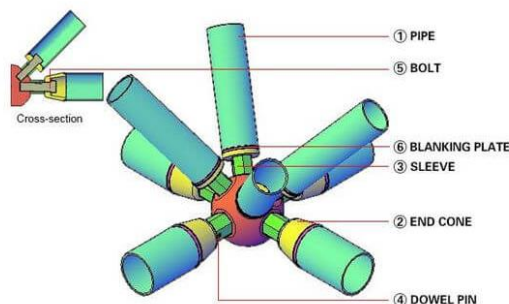
Pembangunan *space frame* pada gedung *Student Center* Universitas Riau ini sudah terlaksana sesuai dengan komponen desain yang telah dibuat konsultan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan perancangan dan optimasi berupa dimensi batang-batang *space frame* yang digunakan, dengan tujuan untuk melihat kemampuan struktur *space frame* mampu menahan beban dengan kombinasi pembebanan yang sama dengan yang desain aslinya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Defenisi Space Frame

Space frame atau rangka ruang adalah struktur rangka tiga dimensi yang batang-batangnya hanya mengalami gaya tekan atau tarik. *Space frame* dikembangkan dari sistem struktur rangka batang dengan penambahan rangka batang ke arah tiga dimensinya. Struktur *space frame* merupakan komposisi dari batang-batang yang masing-masing berdiri sendiri memikul gaya tekan yang sentris dan dikaitkan satu sama lain dengan sistem dalam tiga dimensi atau ruang.

Bentuk *space frame* (rangka ruang) dikembangkan dari pola *grid* dua lapis (*double-layer grids*), dengan batang-batang yang menghubungkan titik-titik *grid* secara tiga dimensional. Sistem konstruksi rangka ruang (*space frame*) menggunakan sistem sambungan antara batang/member satu sama lain yang menggunakan bola atau *ball joint* terintegrasi dengan Sistem Mero sebagai sendi penyambungan dalam bentuk modul segitiga seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Mero
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

Menurut Saudi et al., (2019), pada dasarnya struktur *space frame* (rangka ruang) mempunyai kelebihan atau keuntungan, antara lain:

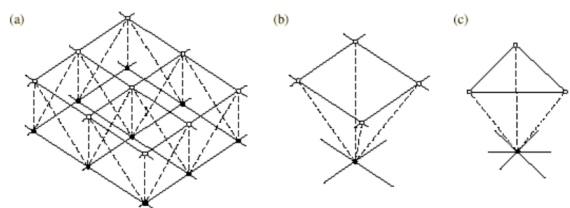
1. Ringan, struktur ini dibangun dengan bahan baja atau aluminium, yang merupakan bahan relatif ringan
2. Menggunakan sistem modular
3. Hemat tenaga kerja dan material struktur
4. Memiliki nilai estetika tersendiri
5. Umur relatif panjang (50-100 tahun)
6. Pembagian beban yang merata, sebuah struktur rangka ruang memiliki kekakuan yang cukup meskipun memiliki struktur yang ringan
7. Kemudahan dalam pemasangan utilitas
8. Sistem stuktur rangka ruang adalah sistem struktur yang memiliki ketahanan tinggi
9. Bentuk geometri yang teratur, sehingga dapat dieksploitasi secara arsitektural untuk menghadirkan efek dalam penerapannya

Selain kelebihan yang dimiliki, sistem struktur *space frame* (rangka ruang) juga memiliki kekurangan, diantaranya adalah:

1. Tidak tahan api karena berbahan dasar logam, sehingga tidak tahan panas dan dapat mengalami leleh akibat panas
2. Tenaga ahli yang masih terbatas

Pada umumnya elemen dasar (modul) pembentuk struktur rangka *space frame* ini, seperti terlihat di Gambar 2 adalah sebagai berikut:

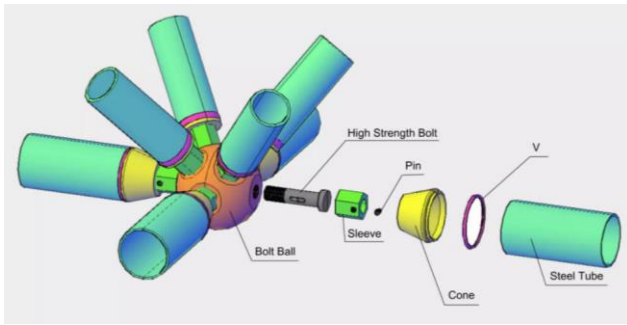
1. Rangka batang bidang
2. Piramida dengan dasar segiempat membentuk *octahedron*
3. Piramida dengan dasar segitiga membentuk tetrahedron



Gambar 2. Elemen Dasar Pembentuk *Space Frame*
(Sumber: *Space Grid Structures*, 2000)

2.2. Komponen-Komponen Penyusun Struktur Space Frame

Struktur *space frame* adalah sistem yang terdiri dari beberapa komponen seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Komponen penyusun *Space Frame*
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

2.2.1. Ball Joint

Bola baja atau juga disebut nodes berbentuk bola pejal yang terbuat dari baja, aluminium, atau kuningan. Penggunaannya tergantung dari fungsi struktur yang direncanakan. Untuk bola baja yang selalu digunakan pada struktur dengan bentang besar harus memiliki kekuatan sambungan yang tinggi, selain faktor artistik yang juga diperhatikan. Bola baja kemungkinan mengalami korosi sangat tinggi, oleh karena itu harus dilakukan pencegahan seperti proses galvanis, lapisan chrom, atau pengecatan. Pada bagian tertentu, tersedia lubang baut yang berguna sebagai titik sambung, atau pemasangan batang pipa, sehingga membentuk rangka ruang yang sangat banyak. Dalam proses produksi bola baja ketepatan arah sudut dan jarak lubang menjadi hal yang penting diperhatikan, karena penyimpangan yang kecil sekalipun akan mempengaruhi perilaku struktur dan mempersulit pelaksanaan pemasangan di lapangan.

2.2.2. Baut

Baut yang biasa digunakan pada perencanaan sambungan Sistem Mero merupakan baut dengan kekuatan tinggi (*High Tensile Bolt* - HT Bolt). Baut mutu tinggi atau baut berkekuatan tinggi tidak diragukan lagi merupakan alat sambung mekanis yang paling banyak digunakan untuk baja struktural. Baut mutu tinggi dapat disebut sebagai baut struktural heksa berat, yang biasanya digunakan bersama mur heksa berat. Panjang ulirnya lebih kecil daripada baut lain yang digunakan untuk keperluan berbeda.

2.2.3. Hexagon/Hexnut

Hexagon bisa juga disebut *hexnut*, merupakan perangkat bantu yang digunakan untuk memutar baut hingga masuk terikat ke bola baja. Kualitas *hexnut* sama dengan *conus*. Komponen ini berguna sebagai pengunci, kontrol, sekaligus pengaku antara struktur atap *space frame*, sehingga setiap titik sambungan menjadi kencang. Selain itu juga untuk menyalurkan beban dan gaya. *Hexnut* berbentuk segi enam dengan panjang tertentu. Ukuran *hexnut* bermacam-macam sesuai dengan batang pipa yang disambung, tetapi tebalnya hampir sama yaitu antara 6-10 cm, walaupun lebih tebal itu diperlukan karena keadaan

konstruksi. *Hexnut* akan bekerja pada saat gaya aksial tekan, karena perangkat inilah yang menumpu langsung ke bola baja.

2.2.4. Dowel Pin

Sambungan baut dirapatkan menggunakan pin pengunci (*dowel pin*) yang sudah ditata secara rapi. *Dowel pin* digunakan untuk membatasi baut ke *hexagon* dimana terdapat lubang di *hexagon* yang memungkinkan pergerakan *dowel pin* dan menunjukkan posisi baut yang masuk ke bola ke dalam bola.

2.2.5. Conus

Conus merupakan perangkat yang berfungsi menghubungkan batang pipa ke sistem sambungan yang menerima dan menyalurkan beban yang bekerja. Bentuk *conus* merupakan bentuk lingkaran dengan model tertentu yang diameternya sesuai dengan pipa yang dipakai. Melalui *conus* inilah beban atau gaya batang pada penampang lingkaran disalurkan ke komponen lain, yaitu *hexagon*. Hubungan *conus* dengan pipa disambung dengan las.

2.2.6. Pipa/Member

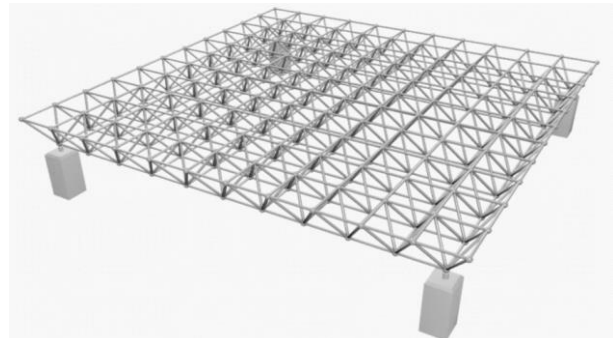
Space frame terdiri dari batang aksial, yang biasa digunakan adalah *tube*, yang lebih dikenal dengan *circular hollow sections*. Ketika beban yang didistribusikan hanya berupa beban aksial, *circular hollow sections* dan *rectangular hollow sections* lebih banyak digunakan karena memiliki jari-jari girasi yang lebih tinggi untuk area yang sama sehingga lebih efisien dibandingkan dengan profil baja lain.

2.3. Jenis-Jenis Struktur *Space Frame*

Jenis-jenis dari struktur *space frame* dapat didasarkan oleh beberapa hal seperti bentuk dari kelengkungan struktur *space frame*, jumlah lapisan struktur yang digunakan, dan bentuk modul atau bentuk dasar dari *space frame*.

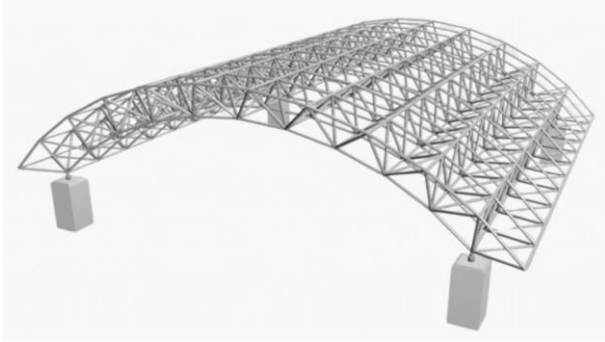
2.3.1. Berdasarkan bentuk kelengkungan:

Flat cover yaitu hasil gubahan dari struktur planar yang mana bidangnya disusun melalui batang horizontal dan gaya lateralnya disokong oleh batang diagonal (Gambar 4).



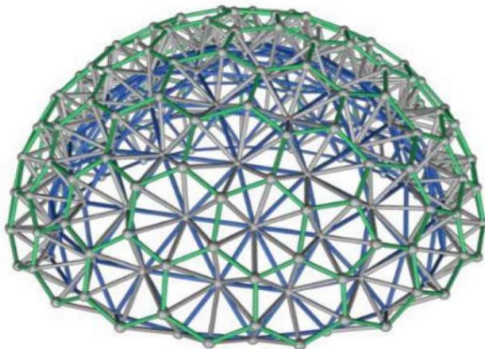
Gambar 4. *Flat Cover*
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

Barrel Vaults merupakan jenis *space frame* yang memiliki potongan diagonal dari suatu lengkungan sederhana yang terdiri dari modul tetrahedron atau piramida sebagai bagian pendukungnya (Gambar 5).



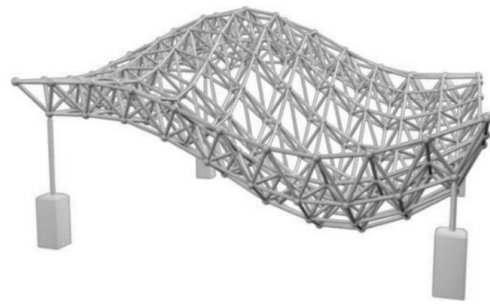
Gambar 5. *Barrel Vaults*
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

Spherical Domes adalah *space frame* berbentuk kubah, bentuk kubah ini membutuhkan modul tetrahedron atau piramida sebagai modul penyusun dan juga disertai dukungan tambahan dari struktur *membrane* (Gambar 6).



Gambar 6. *Spherical Domes*
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

Freeform adalah jenis model *space frame* yang memiliki potongan diagonal yang sama dengan model *barrel vaults* (membentuk lengkungan) tetapi non-simetris atau tidak beraturan dan memiliki titik sumbu yang unik. Bentuk *freeform* biasanya tersusun dari elemen pembentuk struktur rangka piramida dengan dasar segitiga (Gambar 7).



Gambar 7. *Freeform*
(Sumber: www.safsteelstructure.com)

2.3.2. Berdasarkan jumlah lapisan

1. *Single Layer*

Single layer space frame merupakan jenis *space frame* dimana seluruh elemen dari struktur atap tersebut disusun dalam satu permukaan lapisan.

2. *Double Layer*

Double layer space frame adalah jenis *space frame* yang paling sering digunakan, dimana setiap elemen dikelompokkan dalam dua lapisan (bidang) paralel dengan jarak tertentu antar lapisannya. Kedua lapisan ini dihubungkan dengan bagian atau batang diagonal.

3. *Triple Layer*

Triple layer space frame adalah jenis *space frame* yang mana setiap elemen ditempatkan dalam tiga lapisan paralel yang dihubungkan oleh batang diagonal, dengan keseluruhannya nyaris datar. Sistem ini digunakan sebagai solusi untuk mengurangi panjang dari batang diagonal.

2.4. *Desain Batang*

Struktur *space frame* yang penerapannya hanya mengalami gaya dalam berupa gaya tarik dan gaya tekan sehingga dalam perancangan pada suatu batang baja ada beberapa hal harus diperhatikan yaitu persyaratan mengenai batang tarik dan batang tekan seperti:

2.4.1. *Pembatasan Kelangsingan Komponen Struktur Tarik*

Tidak ada batasan kelangsingan maksimum untuk komponen struktur dalam tarik. Untuk komponen struktur yang dirancang berdasarkan tarik, rasio kelangsingan L/r lebih baik tidak melebihi 300. Saran ini tidak berlaku pada batang atau gantungan dalam gaya tarik.

2.4.2. *Desain Kekuatan Tarik*

Perencanaan batang tarik pada hakekatnya menentukan luas penampang lintang yang cukup untuk menahan beban

yang diberikan batang tarik tanpa lubang akan mencapai kekuatan maksimum apabila semua serat penampang lintang batang leleh, dengan kata lain distribusi tegangan tarik sudah merata pada penampang.

Menurut SNI 1729-2020 Pasal B4.3 desain yang sesuai dengan ketentuan untuk desain faktor beban dan ketahanan (DFBK) memenuhi persyaratan spesifikasi bila kekuatan desain setiap komponen struktural sama atau melebihi kekuatan perlu yang ditentukan berdasarkan kombinasi beban DFBK.

$$P_u \leq \phi_t \cdot P_n$$

dengan

- P_u : Kekuatan tarik perlu menggunakan kombinasi beban DFBK
- P_n : Kekuatan tarik nominal
- ϕ_t : Faktor ketahanan
- $\phi_t P_n$: Kekuatan tarik rencana

Menurut SNI 1729-2020 Pasal D2 kekuatan tarik desain ($\phi_t P_n$) dan kekuatan tarik tersedia (P_n / Ω_t), dari komponen struktur tarik, harus nilai terendah yang diperoleh sesuai dengan keadaan batas dari leleh tarik pada penampang bruto dan keruntuhan tarik pada penampang neto.

Menghitung tegangan leleh tarik pada penampang bruto:

$$P_n = F_y \cdot A_g$$

Dengan koefisien reduksi kekuatan sebesar,

- $\phi_t = 0,90$ (DFBK)
- $\Omega_t = 1,67$ (DKI)

Untuk keruntuhan tarik (putus) pada penampang neto:

$$P_n = F_u \cdot A_n$$

Dengan koefisien reduksi kekuatan sebesar,

- $\phi_t = 0,75$ (DFBK)
- $\Omega_t = 2,00$ (DKI)

Dimana:

- A_e : Luas Neto Efektif (mm²)
- A_g : Luas Bruto dari komponen Struktur (mm²)
- F_y : Tegangan leleh minimum yang disyaratkan, (MPa)
- F_u : Kekuatan Tarik Minimum yang disyaratkan, (MPa)
- P_n : Tegangan nominal aksial, ksi (MPa)

2.4.3. Luas Neto Efektif

Luas bruto (A_g) dan luas Netto (A_n) dari komponen struktur tarik harus di tentukan sesuai dengan ketentuan SNI 1729-2020 Pasal B4.3. dimana A_n untuk profil struktur berongga (PSB) yang di las pada plat buhul, luas netto (A_n) adalah luas bruto di kurangi hasil ketebalan dan lebar total material yang dihilangkan untuk membentuk slot tersebut,

namun untuk komponen struktur tanpa lubang, luas netto tersebut (A_n) adalah sama dengan luas bruto (A_g).

2.4.4. Desain Kekuatan Tekan

Batang tekan jarang sekali mengalami tekanan aksial saja. Namun bila pembebanan ditata sedemikian rupa hingga rotasi ujung dapat diabaikan atau beban dari batang-batang yang bertemu pada titik simpul bersifat simetris, maka batang tekan dapat direncanakan dengan aman sebagai batang yang dibebani secara konsentris.

Menurut SNI 1729-2020 Pasal E1 kekuatan tekan desain ($\phi_c P_n$) dan kekuatan tekan tersedia (P_n / Ω_c) di tentukan berdasarkan pada keadaan batas dari tekuk lentur, tekuk torsi dan tekuk torsi-lentur yang berlaku. Nilai faktor reduksi kekuatan untuk metode DFBK dan DKI adalah sebagai berikut:

- $\phi_c = 0,90$ (DFBK)
- $\Omega_c = 1,67$ (DKI)

Untuk kondisi tekan, penampang di klasifikasikan sebagai elemen nonlansing atau penampang elemen lansing. Untuk profil elemen nonlansing, rasio tebal terhadap lebar dari elemen tekan tidak boleh melebihi λ_r . Jika rasio tersebut melebihi λ_r di sebut penampang dengan elemen-lansing. Untuk kondisi lentur, penampang di klasifikasikan sebagai penampang kompak, non kompak atau penampang elemen-lansing.

Untuk penampang kompak, sayap-sayapnya harus menyatu dengan bagian badan dan rasio tebal terhadap lebar dari elemen tekannya tidak boleh melebihi batasnya, λ_p , jika rasio tebal terhadap-lebar dari satu atau lebih elemen tekan melebihi λ_p . tetapi tidak boleh melebihi λ_r , maka penampang tersebut di sebut nonkompak. Jika rasio tebal terhadap-lebar dari setiap elemen tekan melebihi λ_r , di sebut penampang dengan elemen lansing.

Rasio tebal terhadap lebar (D/t) elemen tekan komponen struktur yang menahan tekan aksial untuk profil struktur berongga (PSB) bulat merupakan parameter yang menentukan luasan efektif A_e . Dimana batasan rasio tebal terhadap lebar sebesar $0,11 \times E/F_y$.

Untuk komponen struktur yang dirancang berdasarkan tekan, rasio kelangsingan efektif dapat memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$\frac{K \cdot L}{r} \leq 200$$

Kekuatan tekan nominal (P_n) harus nilai terendah berdasarkan pada keadaan batas dari tekuk lentur, tekuk torsi dan tekuk-lentur yang sesuai.

$$P_n = A_g \cdot F_{cr}$$

Tegangan kritis (F_{cr}) harus di tentukan sebagai berikut:

Bila $\frac{K \cdot L}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, maka $F_{cr} = (0.658^{F_y/F_e}) \cdot F_y$

Bila $\frac{K \cdot L}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, maka $F_{cr} = 0.877 \cdot F_e$

dengan:

F_e : Tegangan tekuk kritis elastis (MPa)

A_g : Luas penampang bruto

K : Faktor panjang efektif

L : Panjang batang tekuk

R : Radius girasi atau jari-jari girasi

3. METODOLOGI

Metode yang dilakukan pada penelitian ini yaitu studi literatur, pengumpulan data, *modelling space frame*, dan kontrol pembebanan, serta melakukan desain batang.

3.1. Studi Literatur

Studi literatur sebagai tahap awal untuk memahami konsep dan teori-teori yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan. Ini melibatkan pencarian referensi dalam bentuk buku dan jurnal penelitian sebelumnya yang fokus pada topik yang sama. Bagian dari studi literatur yang penting dalam penelitian ini adalah eksplorasi terhadap konsep dan prinsip-prinsip yang terkait dengan struktur *space frame*. Metode ini merupakan pengumpulan data untuk mendapatkan tinjauan pustaka. Adapun data-data yang didapatkan berasal dari buku-buku, jurnal, dan dokumen-dokumen yang berhubungan dengan struktur *space frame*.

3.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan adalah data sekunder berupa *shop drawing*, *cutting list*, dan data lainnya terkait dengan *space frame*.

3.3. Pemodelan Space Frame dan Pembebanan

Jenis *space frame* pada sebuah bangunan yang digunakan pada perancangan ini adalah *space frame* dengan model *barrel vaults double layer* dengan modul tetrahedron. *Modelling* dan kontrol pembebanan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* analisa struktur. Input berupa spesifikasi material, dimensi yang direncanakan, serta pembebanan dilakukan pada tahap *modelling* ini. Pembebanan yang digunakan pada perancangan struktur *space frame* ini terdiri dari beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa (Lan, TT., 1999 dan Chilton, J., 2000)

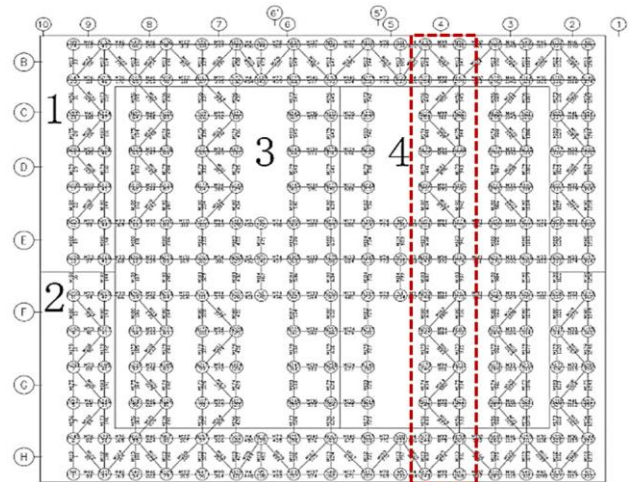
3.4. Analisis Desain Batang

Desain profil batang yang digunakan adalah 4 jenis ukuran diameter yaitu 2 inci, 2,5 inci, 3 inci, dan 5 inci yang

merupakan dimensi yang dipilih dalam perancangan ini. Kemudian setelahnya akan dilakukan kontrol perhitungan analisis batang tarik dan kontrol batang tekan terhadap output pembebanan ultimate.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentang struktur *space frame* yang akan ditinjau dalam perancangan ini adalah bentang yang memiliki semua ukuran diameter, mulai dari ukuran 2 inci sampai 6 inci. Adapun lokasi bentang yang diredesain dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Bentang *Space Frame* Tinjauan

4.1. Spesifikasi Material Batang Space Frame

Spesifikasi material batang atau member *space frame* yang digunakan pada proyek serta perancangan ulang ini sebagai berikut.

1. Mutu Baja : JIS G3444-1982 STK 41
2. Tegangan Leleh (F_y) : 235 Mpa
3. Tegangan Putus (F_u) : 402 Mpa

4.2. Data Pembebanan

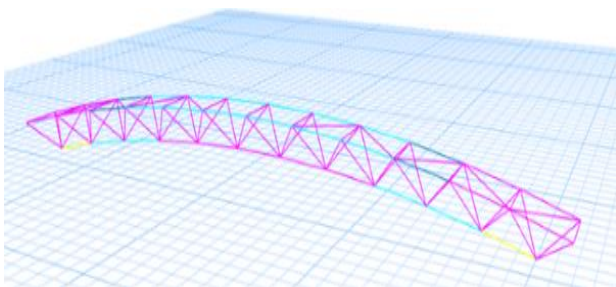
1. Beban Mati (*Dead Load*)
 - a. Berat sendiri rangka *space frame* dihitung dengan menggunakan berat unit sebesar 7850 kg/m³
 - b. Beban mati tambahan:
 - 1) *Ball joint* = 20 kg/joint
 - 2) Beban atap:
 - a) Gording = 8 kg/m²
 - b) Insulasi atap = 4 kg/m²
 - c) Penutup atap = 6 kg/m²
 = 18 kg/m²
 (143 kg/jnt)
2. Beban Hidup (*Live Load*)
 - a. Beban hidup pekerja = 100 kg/joint
 - b. Beban air hujan = 20 kg/joint

3. Beban Angin (*Wind Load*) = 85 mph

4. Beban Gempa (*Earthquake Load*)

- Kelas Situs = SE
- PGA = 0,222 g
- Ss = 0,454 g
- S1 = 0,281 g
- Fa = 1,847
- Fv = 2,875
- Sms = 0,839 g
- Sml = 0,809 g
- Sds = 0,559 g
- Sd1 = 0,539 g
- T₀ = 0,193 detik
- T_s = 0,964 detik

Kombinasi pipa member yang digunakan pada perancangan ulang ini terdiri dari pipa-pipa dengan diameter luar 2 inci, 2.5 inci, 3 inci, dan 5 inci. Diameter 5 inci pada keadaan aslinya adalah diameter 6 inci, diameter 3 inci pada keadaan aslinya adalah diameter 4 inci, diameter 2.5 inci pada keadaan aslinya adalah diameter 3 inci, sedangkan diameter 2 inci pada keadaan aslinya adalah diameter 2.5 inci dan 2 inci.



Gambar 9. Pemodelan struktur *Space Frame*

Pemodelan struktur *Space Frame* dapat dilihat pada Gambar 9. Dalam satu segmen *space frame* yang telah dioptimalisasi, terdapat 4 diameter yang digunakan, dimana diantara pipa-pipa *space frame* tersebut ada yang mengalami tarik, tekan, maupun keduanya.

Batang yang berada pada bagian atas (lapis kedua) akan mengalami tekan, yaitu *member-member* berdiameter 2 inci, 2.5 inci, dan 3 inci, sedangkan member yang berada pada lapis bawah (lapis pertama) akan mengalami tarik, yaitu *member-member* berdiameter 2 inci, 3 inci, dan 5 inci. Kemudian untuk *member-member* yang berada pada bagian diagonal, akan mengalami tarik atau tekan, dimana seluruh member pada bagian tersebut adalah *member* berdiameter 2 inci.

Hasil rekapitulasi perhitungan analisis perancangan optimalisasi batang tarik dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Rekapitulasi Analisis Batang Tekan

Jenis Pipa	OD 2"	OD 2,5"	OD 3"
------------	-------	---------	-------

Diameter Luar	50,80	63,50	76,20
Dia. Dalam (mm)	46,20	57,90	69,80
Wall Thickness	2,30	2,80	3,20
Pu (kg)	765,62	1.400,11	2.896,32
I (mm ⁴)	103.273,41	246.437,68	489.792,54
r (mm)	17,17	21,48	25,83
(KL/r) < 200	185,65	143,04	118,25
F _e (Mpa)	19,14	32,24	47,18
F _{cr} (Mpa)	16,98	28,60	29,22
P _n (kg)	5950,00	15271,26	21440,86
φP _n (kg)	5355,00	13744,13	19296,77
Kontrol Tekan	OK	OK	OK

Hasil rekapitulasi perhitungan analisis perancangan optimalisasi batang tekan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Rekapitulasi Analisis Batang Tarik

Jenis Pipa Member	OD 2"	OD 3"	OD 5"
Diameter Luar (mm)	50,80	76,20	127,00
Diameter Dalam	46,20	69,80	119,00
Wall Thickness (mm)	2,30	3,20	4,0
A _g (mm ²)	350,44	733,88	1.545,66
P _u (kg)	765,62	2896,32	4233,33
φP _n = 0,9 F _y .A _g (kg)	7.411,90	15.521,48	32.690,78
φP _n = 0,75 F _u .A _g (kg)	10.565,91	22.126,36	46.601,76
Kontrol Leleh Tarik	OK	OK	OK
Kontrol Fraktur Tarik	OK	OK	OK

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil studi tentang perhitungan dan optimalisasi penggunaan struktur *space frame* pada struktur rangka atap didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Batang *space frame* yang berdiameter 2", 3", dan 5" yang mengalami gaya tarik memenuhi seluruhnya untuk kondisi batas leleh dan batas fraktur, dengan beban *ultimate* (P_u) untuk tiap diameter tersebut berurutan yaitu 765,62 kg, 2.896,32 kg, dan 4.233,33 kg, yang mana lebih kecil dari kekuatan nominal rencana (φP_n). Pada batang diameter 2", φP_n untuk batas leleh adalah 7.411,90 kg dan φP_n untuk batas fraktur yaitu 10.565,91 kg, untuk diameter 3", φP_n untuk batas leleh adalah 15.521,48 kg dan φP_n untuk batas fraktur yaitu 22.126,36 kg, dan untuk diameter 5", φP_n untuk batas leleh adalah 32.690,78 kg dan φP_n untuk batas fraktur yaitu 46.601,76 kg.
2. Batang *space frame* berdiameter 2", 2,5", dan 3" yang mengalami gaya tekan memenuhi seluruhnya untuk kontrol batang tekan, dengan beban *ultimate* (P_u) untuk tiap diameter tersebut berurutan yaitu 765,62 kg, 1.400,11 kg, dan 2.896,32 kg, yang mana lebih kecil dari kekuatan nominal yang telah dikali faktor reduksi (φP_n) untuk tiap diameter tersebut berurutan yaitu 5.355 kg, 13.744 kg, dan 19.297 kg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim., *The Main Reason for The Rapid Development of Steel Space Frame Structures.*, www.safsteelstructure.com/news/why-space-frame-is-developing-fast., [Accessed: Agt. 01, 2023].
- [2] Anonim. The Principle of *Space Frame* Construction. www.safsteelstructure.com/news/the-principle-ofspace-frame-construction . [Accessed: Agt. 01, 2023].
- [3] Badan Standarisasi Nasional. SNI 1729:2020. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, 2020.
- [4] Badan Standarisasi Nasional. SNI 1726:2019. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, 2019.
- [5] Badan Standarisasi Nasional. SNI 1727:2020. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, 2020.
- [6] Lan, T. T. *Space Frame Structures*. Structural Engineering Handbook Ed. Chen Wai-Fah Boca Raton: CRS Press LCC, 1999.
- [7] Chilton, J. *Space Grid Structures*. Oxford: Architectural Press. 2000
- [8] Saudi, I. M., Hamdy, M. A., & Idris, S. “Jurnal Arsitektur Sulapa.” Penerapan Struktur *Space Frame* pada Bangunan Terminal Angkutan Darat Kota Palopo. Volume 1, 2019, Pages 32-43.