

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait Sebelumnya

Penelitian sebelumnya yang mengangkat topik analisis metode elemen hingga yaitu sebagai berikut :

1. **Efendi (2017)** Pengaruh Model Dan Sifat Material Pada Analisis Metode Elemen Hingga Balok Tabung Baja Bundar Diisi Beton

Material komposit tabung baja diisi beton mulai banyak direkomendasikan dalam proyek struktural modern. Struktur CFST ini mempunyai struktur yang lebih baik. Model elemen hingga tiga dimensi dilakukan dengan memakai sifat material baja dan beton *non linier*. Sifat *non linier* geometri juga diperhitungkan. Hasil dari analisis metode elemen hingga lalu dibandingkan dengan hasil eksperimen tabung baja bundar diisi beton. Hasil dari analisis ini menghasilkan beban-lendutan dan kondisi balok pada beban runtuh sama dengan hasil eksperimen. Fenomena *buckling* tidak dimodelkan dalam analisis metode elemen hingga. Pengaruh pemodelan setengah bentang dan model setengah penampang setengah bentang balok diperhitungkan. Hasil analisis sama dengan hasil analisis skala penuh. Sendi plastis terjadi di tengah bentang balok. Pengaruh sifat material linier dan sifat

geometric non linier diperhitungkan. Hasilnya tidak terjadi sendi plastis di tengah bentang balok.

2. **Soraya, Yudo, dan Arswendo (2016)** Analisa *Buckling* Tiang *Mast Crane* Akibat Beban Lentur Menggunakan *Software* Berbasis Metode Elemen Hingga

Crane merupakan mesin bantu yang digunakan untuk mengangkat dan memindahkan barang-barang berat yang tidak mampu diangkat dan dipindahkan oleh manusia. Kekuatan struktur pada tiang *crane* sangat penting dalam suatu struktur. Dan salah satu kegagalan struktur yang sering terjadi pada tiang *crane* adalah *buckling* atau tekuk. Dan sudah diketahui bahwa momen *buckling* yang terjadi dapat dikurangi dengan menambahkan tinggi pada tiang *crane*. Penyebab terjadinya *buckling* sangat bermacam-macam, salah satunya adalah kondisi pembebanan. Pada penelitian ini, tinggi tiang divariasikan menjadi 4 macam dengan menggunakan momen *bending*. *Buckling* dianalisa menggunakan metode elemen hingga dengan mempertimbangkan sifat material pada tiang, yaitu elastis dan elasto-plastis, serta deformasi yang terjadi pada setiap tiang. Untuk analisa elasto-plastis, momen *buckling* berkisar 8.3×10^7 Nm. Semakin tinggi tiang yang di mana semakin besar nilai L/D , maka semakin besar terjadinya deformasi. Tetapi, dengan semakin besar nilai deformasi, momen *buckling* yang terjadi semakin kecil dan yang akhirnya akan konstan. Sama halnya dengan *safety factor*, semakin tinggi tiang nilai SF akan berkurang dan akhirnya konstan. Pada penelitian ini didapatkan nilai SF sebesar 9.89.

3. **Anandya (2016)** Analisis Elemen Hingga Pada Proses Bending Pipa Berpenampang Persegi Dan Persegi Panjang Dengan Laser

Dari segi kekuatan, ketahanan terhadap korosi dan ketahanan terhadap *buckling*, baja tahan karat AISI 304 menjadi salah satu pipa dengan luas penampang segi empat yang banyak digunakan. Namun, proses *bending* konvensional dengan mekanik memiliki banyak keterbatasan pada bending radius dan diameter pipa yang akan ditekuk. Sehingga, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mencapai hasil proses laser *bending* yang optimal. Analisa yang digunakan adalah termal dan mekanik. Parameter-parameter yang digunakan adalah bentuk penampang persegi dan persegi panjang, laser *power*, *scanning speed*, *scanning path* dengan masing-masing dua variasi. Variasi tersebut dianalisa untuk mendapatkan hasil proses laser *bending* yang paling optimal. Dari simulasi yang dilakukan menghasilkan tegangan, distorsi dan *bend angle* terbesar adalah skema *circumferential* dengan *power* 1500W *scanning speed* 10 mm/s dengan nilai tegangan maksimum 414 Mpa.

2.2 Teori Pendukung Penelitian

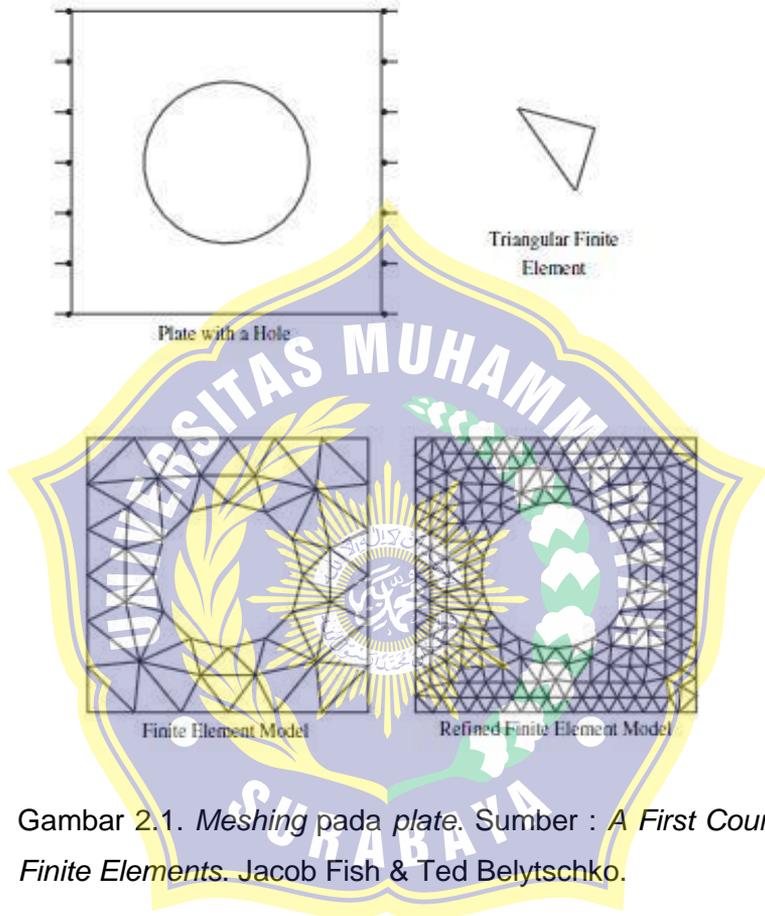
2.2.1 Analisis Elemen Hingga (FEA/FEM)

adalah metode numerik untuk memecahkan masalah teknik dan fisika matematika. Berguna untuk masalah yang rumit geometri, beban, dan sifat material di mana solusi analitis tidak bisa diperoleh.

Finite Element Method (FEM) atau biasanya disebut *Finite Element Analysis (FEA)*, adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti analisa tegangan pada struktur, perpindahan panas, *elektromagnetis*, dan aliran fluida (*Moaveni*).

Metode ini digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *exact solution/analytical solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari *FEM* adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*.

Sebuah *plate* yang akan dicari distribusinya, bentuk geometri *plate* di-*meshing* menjadi bagian-bagian kecil bentuk segitiga untuk mencari solusi yang berupa distribusi temperatur *plate*. Sebenarnya kasus ini dapat diselesaikan dengan cara langsung yaitu dengan persamaan kesetimbangan panas (*heat balance equation*). Namun untuk geometri yang rumit seperti *engine block* diperlukan FEM untuk mencari distribusi temperatur.



Gambar 2.1. *Meshing* pada *plate*. Sumber : *A First Course in Finite Elements*. Jacob Fish & Ted Belytschko.

Langkah Dasar dalam Metode Elemen Hingga

Langkah-langkah dasar dalam *finite element analysis* adalah sebagai berikut :

Processing Phase

- 1) Membuat dan menentukan daerah yang akan diselesaikan menggunakan elemen hingga, kemudian menguraikan masalah menjadi nodal-nodal dan elemen-elemen.
- 2) Mengasumsikan bentuk fungsi untuk menggambarkan sifat fisik dari sebuah elemen, yang merupakan pendekatan fungsi kontinyu yang diasumsikan untuk menggambarkan solusi dari sebuah elemen.
- 3) Menyelesaikan persamaan untuk sebuah elemen.
- 4) Menyatukan elemen-elemen untuk menghadirkan keseluruhan masalah. Membentuk matrik kekakuan global *discretize*.
- 5) Terapkan kondisi batas, kondisi awal dan pembebanan.

Solution Phase

Memecahkan satu set persamaan aljabar *linier* atau *non linier* secara cepat untuk mendapatkan hasil nodal seperti nilai perpindahan pada nodal-nodal yang berbeda atau nilai temperatur pada nodal-nodal yang berbeda dalam masalah perpindahan panas.

Postprocessing Phase

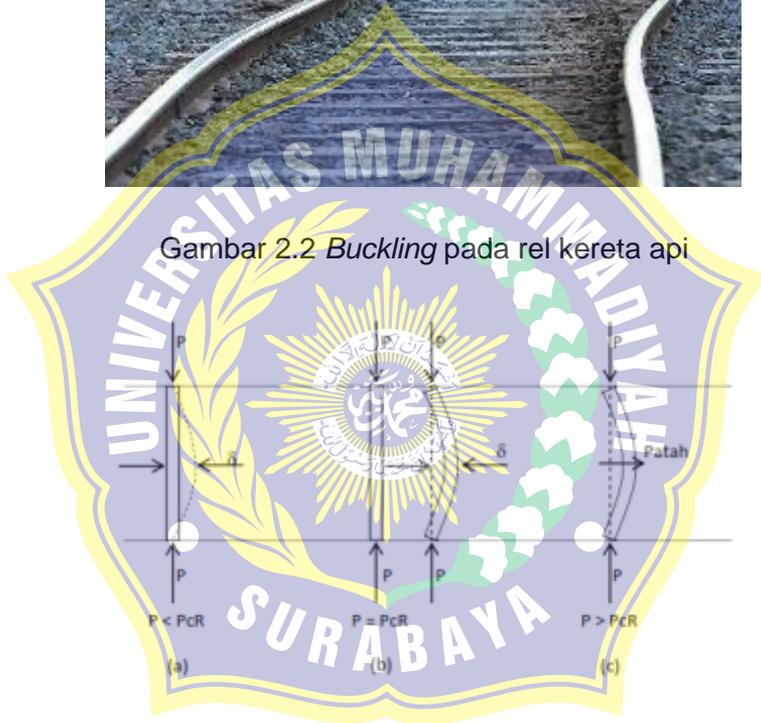
Pada sesi ini kita akan mendapatkan informasi penting lainnya. Seperti nilai tegangan (*stress*) dalam analisa statik, distribusi kecepatan mekanika fluida, distribusi temperatur dan lain-lain.

2.2.2 Analisa *Buckling* Atau Tekukan/Lendutan

Dalam suatu konstruksi baik itu bidang mekanikal maupun bidang sipil atau bidang-bidang lain yang berkaitan dengan teknik pasti terdapat sebuah kolom dari suatu konstruksi. Istilah ini lebih diperjelas mengenai pembahasan *buckling*. Panjang kolom atau penopang yang ditekan secara aksial maka akan menekuk secara literal, ketimbang gagal dalam tekanan langsung dan ini merupakan istilah *buckling* yang lebih umum. Pada contoh di bawah ini merupakan kasus-kasus akibat beban *buckling* yang dapat membuat gagalnya suatu konstruksi.



Gambar 2.2 *Buckling* pada rel kereta api



Suatu bagian konstruksi mengalami gaya tekan baik dari beban konstruksi itu sendiri maupun dari beban luar yang bekerja secara aksial yang akan menekuk secara literal. Suatu kolom yang menerima beban tekan (P), sebelum hancur ia akan menekuk terlebih dahulu.

Pada dasarnya pembebanan *buckling* dapat diklasifikasikan berdasarkan kesetimbangannya, yaitu kesetimbangan stabil, kesetimbangan netral, kesetimbangan labil, berikut penjelasan gambarnya.

(Gambar Kesetimbangan Beban *Buckling*).



Penjelasan gambar :

Batang yang langsing, yaitu mempunyai perbandingan L dan D yang cukup besar, dibebani beban P lebih kecil dari pada P .

Keterangan :

L : Panjang Batang

D : Diameter Batang

P : Gaya Tekan

P_E : Pembebanan Kritis *Buckling* (gaya kritis)

Karakteristik batang pada keadaan ini adalah :

- Batang dalam keadaan kesetimbangan stabil.
- Pada saat P bekerja, batang menekuk sebesar δ .
- Apabila gaya P dihilangkan, batang kembali menjadi lurus seperti semula.

Batang dibebani gaya tekan P sama dengan gaya P , maka karakteristik batang adalah sebagai berikut :

- Batang dalam keadaan kesetimbangan netral.
- Pada saat P bekerja, batang menekuk sebesar δ .
- Apabila gaya P dihilangkan, batang tetap pada keadaan yang baru ($\delta = \text{tetap}$).
- Gaya kritis $P_{cr} = P_{\text{tekuk}} = P_{\text{max}} - P$, yang dapat didukung oleh batang.

Batang dibebani gaya tekan P yang lebih besar dari gaya P_{cr} maka karakteristik batang adalah :

- Batang dalam keadaan kesetimbangan (labil).
- Pada saat gaya P bekerja, batang menekuk sebesar δ .
- Pada saat gaya P bekerja dengan berat yang konstan, maka batang akan menekuk terus menerus, sampai akhirnya menjadi patah.

Analisis teoritis paling sederhana untuk sebuah kolom, panjang L yang dijepit pada ujung-ujungnya serta mengalami suatu pembebanan tekan aksial P memberikan relasi sebagai berikut :

$$El \frac{d^2v}{dx^2} = Pv'$$

Keterangan:

P : Beban Tekan Aksial

v' : Lendutan Lateral

Rujukan perhitungan analisa tekuk dapat menggunakan beberapa persamaan, antara lain persamaan *Euler*, persamaan *Tetmejer* dan persamaan *Rankine Gordon*, berikut penjabarannya.

Analisis Tekuk Elastis (Persamaan *Euler*)

Perumusan *Euler* diturunkan dengan asumsi-asumsi :

- Kolom lurus sempurna, gaya tepat bekerja pada sumbu kolom.
- Kolom merupakan kolom yang langsing dan struktural.
- Hukum *Hooke* masih tetap berlaku.
- Peletakan kolom di bagian bawah tetap, sedangkan di bagian atas sendi bergerak ke atas struktur bawah, tetapi tidak bergerak ke samping.

Harga pembebanan kritis P_E diberikan (persamaan *Euler*) :

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{KL^2}$$

Dengan K , struktur sendi *buckling*:

0.7 : Untuk kolom satu terikat dan lainnya saling mendukung

0.5 : Untuk kolom kedua ujungnya terikat

2 : Untuk kolom satu ujungnya bebas dan satu ujung lainnya bebas

Persamaan di atas dapat dituliskan melalui tegangan langsung dengan luas penampang :

$$\sigma_E = \frac{P_E}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Dimana:

σ_E : Tegangan Tekuk *Euler* (N/mm²)

P_E : Beban Tekuk *Euler* (N)

E : Modulus Elastisitas (N/mm²)

Dan rasio kerempingan (λ) dapat dicari menggunakan persamaan :

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{I}{A}}}$$

Keterangan:

λ : Rasio Kerempingan

L : Panjang Kolom (mm)

I : Momen Inersia (mm⁴)

A : Luas Penampang (mm²)

Ketentuan nilai Rasio Kerempingan:

$\lambda > 100$, batang berperilaku elastis, berlaku rumus *Euler*.

$\lambda < 100$, batang berperilaku tidak elastis, berlaku rumus *Tetmejer*.



Analisis Tekuk (Persamaan *Tetmejer*)

Persamaan garis lurus ini dibuktikan oleh sebuah percobaan yang dilakukan oleh *Tetmejer* dan *Bauschinger*, dan *Tetmejer* menemukan bahwa rasio kerampingan yang berbeda dengan persamaan *Euler* :

$$\lambda = 10 - 90 \qquad \sigma_K = 335 - 0.62 \lambda$$

$$\lambda > 90 \qquad \sigma_K = 222.1 \times \lambda^2$$

Keterangan:

Zigma K : Tegangan *Buckling Tetmejer* (N/mm²)

Analisis Tekuk (Persamaan *Rankine Gordon*)

Pada analisis tekuk persamaan *Rankine Gordon* menyarankan untuk beban tekan maksimum dan menghasilkan perkiraan konservatif gaya maksimum baru. Dimana perumusannya sebagai berikut :

$$\frac{1}{F_{max}} = \frac{1}{P_e} + \frac{1}{P_c}$$

Untuk P_c :

$$P_c = \sigma_y A$$

Keterangan:

F_{max} : Beban Maksimum Persamaan *Rankine* (N)

P_E : Beban Kritis Persamaan *Euler* (N)

P_C : Gaya Tekan Maksimum (N)

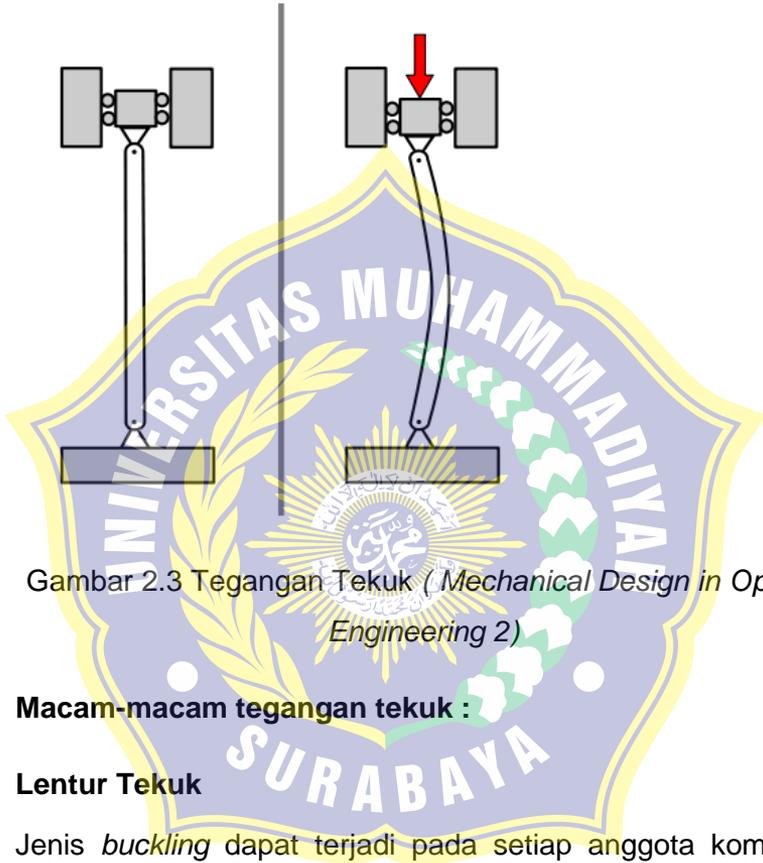
Zigma y : Tegangan Luluh Material (N/mm²)

A : Luas Penampang Kolom (mm²)

Bahasan mengenai beban *buckling* di atas diambil dari beberapa struktural yang berkaitan, bila kita mencari analisa tegangan *buckling* maka kita akan menemui banyak perbedaan-perbedaan dari segi rumus dan proses perhitungan, namun pada dasarnya semua perbedaan itu memiliki kesamaan, mengingat untuk beberapa analisa *buckling* juga dapat diperoleh melalui sebuah nilai pengalaman yang sudah dilakukan, akan tetapi tetap merujuk kepada beberapa struktural yang dianjurkan dan bila diperlukan buatlah perbandingan antara perhitungan satu struktural dengan struktural lainnya. Dilain hal banyak juga terdapat *software-software* keteknikan yang sudah mampu untuk menganalisa beban *buckling*, seperti *Solidworks*, *ANSYS*, *NX Nastran*, dll.

Buckling stress atau tegangan tekuk (lendutan) adalah ketidakstabilan yang mengarah ke modus kegagalan. Secara teoritis, tegangan tekuk disebabkan oleh bifurkasi dalam solusi untuk persamaan keseimbangan statis. Adapun definisi lain mengenai tegangan tekuk adalah suatu proses dimana suatu struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya. Konsekuensi *buckling* pada dasarnya adalah masalah struktural dasar, dimana terjadi lendutan besar sehingga akan mengubah bentuk struktur. Fenomena tekuk atau *buckling* dapat terjadi pada sebuah kolom langsing,

lateral buckling balok, pelat tipis dan batang silindris di bebani aksial sumbu dan batang silindris dibebani tegak lurus sumbu.



Gambar 2.3 Tegangan Tekuk (*Mechanical Design in Optical Engineering 2*)

Macam-macam tegangan tekuk :

➤ **Lentur Tekuk**

Jenis *buckling* dapat terjadi pada setiap anggota kompresi yang mengalami defleksi yang disebabkan oleh pembengkokan atau lentur. Lentur tekuk terjadi sekitar sumbu dengan rasio kelangsingan terbesar, dan jari-jari terkecil rotasi.

➤ **Torsional *Buckling***

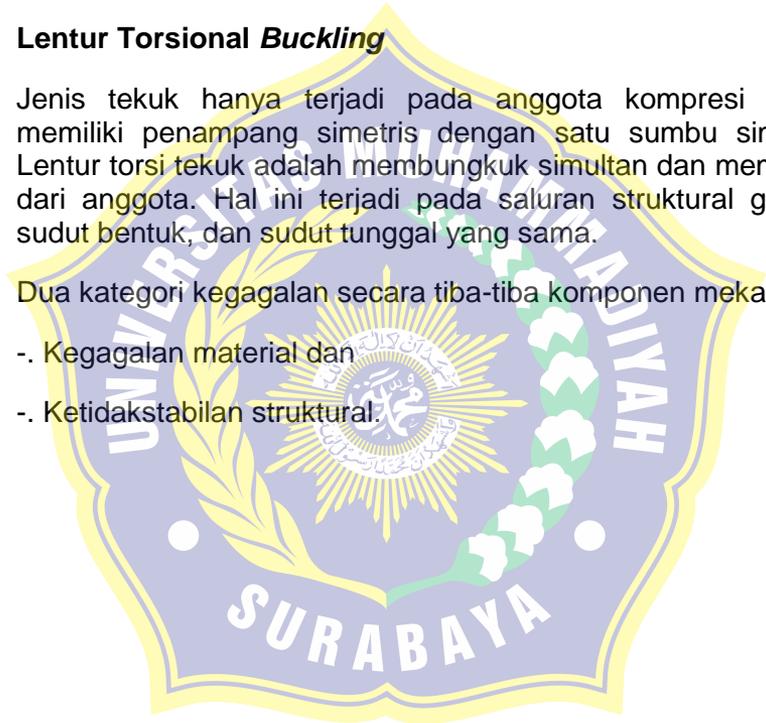
Jenis tekuk hanya terjadi pada anggota kompresi yang ganda-simetris dan memiliki sangat ramping *cross-sectional element*. Hal ini disebabkan oleh balik tentang sumbu *longitudinal*. Torsi tekuk terjadi terutama di bagian *build-up*, dan di bagian struktur tidak digulung.

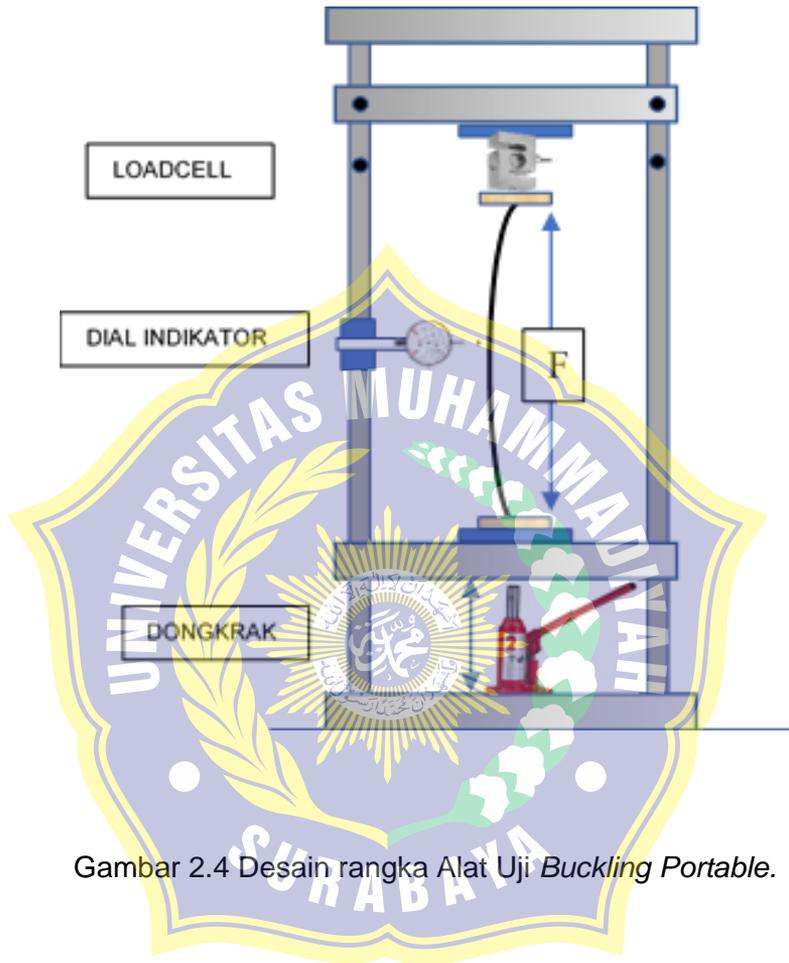
➤ **Lentur Torsional *Buckling***

Jenis tekuk hanya terjadi pada anggota kompresi yang memiliki penampang simetris dengan satu sumbu simetri. Lentur torsi tekuk adalah membungkuk simultan dan memutar dari anggota. Hal ini terjadi pada saluran struktural ganda sudut bentuk, dan sudut tunggal yang sama.

Dua kategori kegagalan secara tiba-tiba komponen mekanis :

- . Kegagalan material dan
- . Ketidakstabilan struktural.





Gambar 2.4 Desain rangka Alat Uji *Buckling Portable*.