

Studi Analitik Dan Simulasi *Buckling* Pada Komponen *Pull Rod* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Akhmad Zidni Hudaya^{1,*}, Moh Giri Purnomo Ajie², Qomaruddin³
^{1,2,3}Program Studi S-1 Teknik Mesin, Universitas Muria Kudus, Indonesia

Article Info

Article history:

Received February 22, 2023
Accepted May 3, 2023
Published May 30, 2023

Kata Kunci:

Vertical roller mill
Pull Rod
Buckling
Fracture

ABSTRAK

Mesin *vertical roller mill* merupakan alat penggiling batubara yang mengalami permasalahan pada salah satu komponen kritis yaitu *pull rod*, mengalami patah menjadi dua bagian hingga menyebabkan *breakdown*. Tujuan penelitian ini melakukan perhitungan gaya, simulasi dan analisa *buckling* serta memodifikasi *pull rod*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi studi lapangan, identifikasi, pengumpulan data, studi literature, menghitung gaya, simulasi dan analisa *buckling*, menentukan rekomendasi modifikasi *pull rod* dari kegagalan yang terjadi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, besar gaya yang menyebabkan kegagalan 726097,6 N. Hasil simulasi berdasarkan lokasi kegagalan yang disebabkan oleh *buckling* akibat gaya tekan yang tidak seimbang yang menyebabkan perputaran sudut hingga berdeformasi maksimum cenderung pada bagian atas, dari hasil analisa dengan nilai K 0,76 dimana *pull rod* mengalami kondisi tekuk *elastic*. Modifikasi yang dapat dilakukan untuk mengatasi kegagalan yang terjadi dengan memodifikasi diameter *shaft pull rod* 140 mm dengan nilai total deformasi 0,62032 mm dan beban kritis 9598284,1 N.



Corresponding Author:

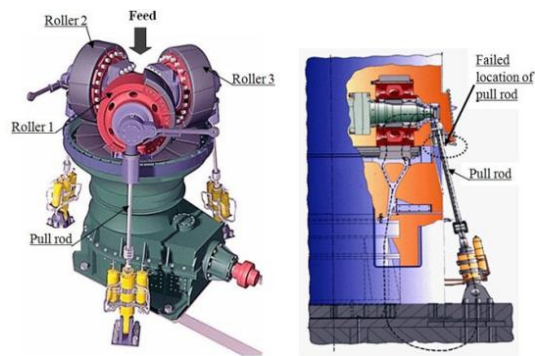
Akhmad Zidni Hudaya,
Program Studi S-1 Teknik Mesin,
Universitas Muria Kudus, Indonesia
Jl. Lkr. Utara, Kayuapu Kulon, Godangmanis, Kec. Bae, Kabupaten Kudus, Jawa Tengah 59327.
Email: *Akhmad.zidni@umk.ac.id

1. PENDAHULUAN

PT. Semen Gresik Rembang merupakan salah satu perusahaan *manufacture* yang berada di kota rembang yang memproduksi semen sebagai produk utamanya. PT. Semen Gresik Rembang merupakan anak perusahaan dari PT. Semen Indonesia (SIG). Semen *portland* yang diproduksi tersebut dihasilkan melalui serangkaian proses dengan bahan baku utama meliputi batu kapur (*limestone*), pasir silika (*silica sand*), pasir besi (*iron sand*) dan *gypsum*, ditambah batubara (*coal*) sebagai bahan baku pembakaran utamanya. Proses produksi semen secara umum dibagi menjadi lima tahapan utama yaitu penyediaan bahan baku, penggilingan bahan baku, pembakaran, penggilingan akhir, dan pengantongan atau pengemasan[1].

Permasalahan yang terjadi pada tahap proses pembakaran, pada salah satu komponen kritis mesin *vertical roller mill* yang digunakan untuk menggiling batubara yaitu komponen *pull rod* yang berfungsi untuk mentransmisikan gaya secara vertikal dengan kemiringan tertentu secara langsung ke dalam sistem hidrolik, yang mengalami patah menjadi dua bagian hingga menyebabkan *breakdown*. Dari kegagalan tersebut penyebab kegagalan terjadi karena tiga faktor penyebab yaitu diantaranya *buckling*, *fatigue*, *vibration*. Sehingga dari faktor penyebab tersebut berdasarkan lokasi patahnya *pull rod* dari beberapa penyebab terjadinya kegagalan pada *pull rod* yang paling dominan, penyebab kegagalan pada komponen *pull rod* diakibatkan oleh *buckling*.

Mengingat semakin langsing atau semakin panjang suatu kolom, kekuatan penampangnya akan semakin berkurang bersamaan dengan timbulnya kasus tekuk yang dihadapi. Panjang batang atau kolom merupakan faktor utama penyebab terjadinya kegagalan komponen struktur akibat fenomena tekuk (*buckling*)[2]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan besarnya gaya yang menyebabkan kegagalan, melakukan simulasi dan analisa *buckling* yang menyebabkan kegagalan, serta melakukan modifikasi pada komponen *pull rod* dari kegagalan yang terjadi.

Gambar 1. Komponen mesin *vertical roller mill*[3]

Adapun salah satu masalah fundamental dari *mechanical engineering* adalah menentukan pengaruh beban pada komponen mesin. Dimana intensitas gaya pada suatu benda didefinisikan sebagai tegangan. Tegangan bisa diartikan gaya persatuan luas[4]. *Buckling* merupakan suatu proses dimana suatu material atau struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya, sedemikian rupa berubah bentuk dalam rangka menentukan keseimbangan baru. Secara umum tekuk (*buckling*) biasanya terjadi pada elemen struktur atau kolom yang panjang, langsing dan dibebani oleh tekan aksial[5]. *Buckling* analisis adalah teknik yang digunakan untuk menentukan beban tekuk kritis, beban dimana struktur menjadi tidak stabil dan bentuk modulus melengkung bentuk karakteristik yang terkait dengan respon struktur yang melengkung[6].

Kolom merupakan sebuah kondisi batang yang langsing berwujud tiang penyangga yang diberikan beban aksial tekan diujungnya. Dimana kolom terbagi menjadi dua macam diantaranya yaitu jenis kolom pendek memiliki kegagalan yang ada kegagalan pada suatu benda (ditentukan dari kemampuan benda), sifat kondisi kolom yang mempunyai angka pendek dengan panjang dan dimensi penampang melintang sangat kecil, kolom panjang merupakan kolom yang memiliki kegagalan material diatur oleh tekuk (*buckling*), maka kegagalan karena ketidakstabilan dimensi arah perpanjang jauh lebih hebat di banding dimensi arah sebaliknya[7].

Kegagalan tekuk (*buckling*) pada kolom dengan faktor penempatan jepit-jepit, hasil analisis menggunakan SNI 03-1729-2002 dengan nilai K teoritis 0,5 sehingga model tekuk yang terjadi posisi lokasi kegagalan pada kolom terdapat pada bagian tengah kolom[8]. Sedangkan untuk posisi lokasi kegagalan yang terjadi pada komponen *pull rod*, cenderung dibagian atas yang dapat dilihat pada gambar 3. akibat gaya tekan yang tidak sesumbu dengan faktor penempatan jepit-jepit, dari permasalahan tersebut maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan nilai K teoritis sesuai lokasi kegagalan yang terjadi pada struktur *pull rod* dengan menggunakan metode elemen hingga.

Pada penelitian[9], metode elemen hingga (MEH) juga digunakan untuk meneliti kegagalan tekuk lokal pada baja ringan canai dingin profil C yang didukung dengan penelitian eksperimental oleh[10]. Metode elemen hingga (MEH) sering digunakan untuk menganalisis masalah fisika maupun teknik secara matematis[11]. Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk mengatasi masalah nilai batas yang dikarakteristikan dengan persamaan diferensial parsial dan kondisi batas, metode elemen hingga pada penelitian ini menggunakan *software ansys student R2 2022* serta menggunakan metode analisis *static structural* dan *eigenvalue buckling*.

Analisis *static structural* merupakan model analisis *structur part* untuk mengetahui batas kemampuan *part* dengan material tertentu dalam menahan beban yang dikenakan kepadanya secara *static* baik tekan dan tarik maupun beban puntir. Sedangkan analisis *eigenvalue buckling* adalah teknik analisis elemen hingga yang digunakan untuk menentukan kekuatan beban *buckling* dan mode bentuk *buckling* pada struktur *elastic linear ideal*. Untuk analisis tekuk linear masalah *eigen* dipecahkan untuk mendapatkan *buckling load multiplier* dan mode tekuk. *Load multiplier* merupakan faktor pengali yang diterapkan beban dimana struktur melengkung[12].

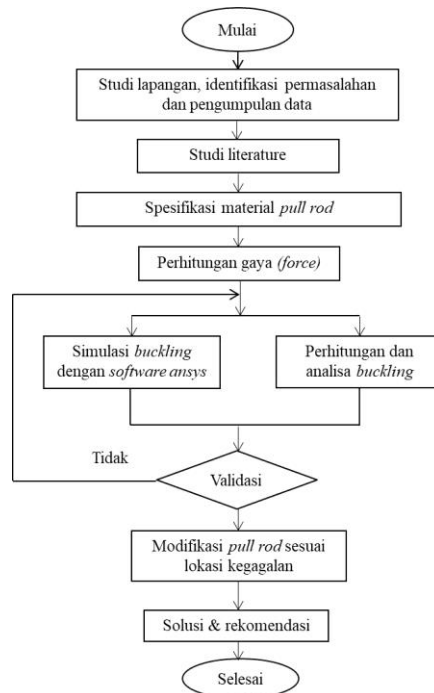
Beban atau gaya yang bekerja pada suatu benda atau konstruksi akan mengakibatkan adanya perubahan bentuk pada benda atau konstruksi tersebut. Pada prinsipnya beban terhadap terdeformasi merupakan suatu gaya yang melakukan aksinya terhadap benda padat sehingga menyebabkan *causative influences* yang menyebabkan terjadinya deformasi[13]. Berdasarkan beban yang bekerja, deformasi dapat dibagi antara lain perubahan panjang, perputaran sudut, geser, torsi, dan punter. Perubahan panjang pada suatu konstruksi atau benda disebabkan oleh gaya normal yang bekerja pada konstruksi benda tersebut.

Faktor keamanan (*safety faktor*) digunakan sebagai metode untuk mengevaluasi keamanan komponen atau struktur meskipun dimensi yang digunakan minimum. Istilah faktor desain N, adalah ukuran relatif keselamatan komponen pembawa beban. Masih dalam kasus lain, khususnya untuk kasus tekuk kolom, faktor desain diterapkan pada beban kolom bukan kekuatan materialnya[14].

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alur Penelitian

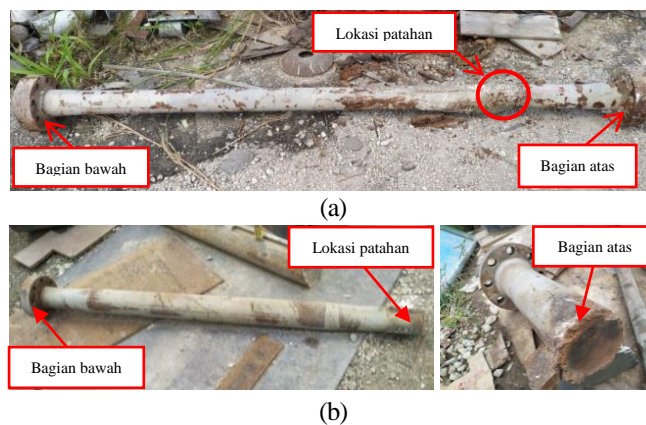
Gambaran umum tahap pelaksanaan proses studi analitik dan simulasi *buckling* ini dapat dilihat pada diagram alur seperti berikut:



Gambar 2. Flowchart

2.2. Identifikasi Masalah

Dimana pada identifikasi masalah diarea penggilingan batubara (*coal mill*) ditemukan kegagalan pada komponen *pull rod* yang mengalami patah menjadi dua bagian, dimana ditemukan dua patahan *pull rod* dengan lokasi kegagalan yang sama seperti gambar berikut :

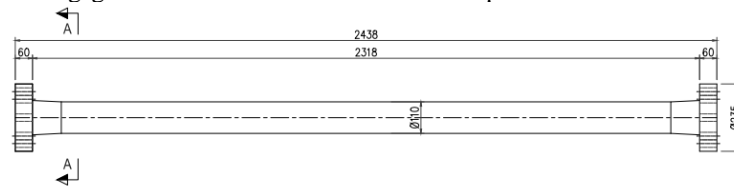


Gambar 3. Kegagalan *pull rod* (a) sebelum atau *original* (b) sesudah dimodifikasi

Dilihat pada gambar 3(a) merupakan bentuk desain *original pull rod* sebelum dimodifikasi, historisnya dari hasil wawancara *pull rod* sebelum patah mengalami tekuk *elastic*. Selanjutnya pada gambar 3(b) dengan kegagalan yang sama pada komponen *pull rod* yang sudah dimodifikasi terlihat bahwa posisi patahnya *pull rod* cenderung sama pada bagian atas, sehingga dugaan akan putusnya *pull rod* akibat besarnya gaya yang diterima *pull rod* secara terus menerus yang menyebabkan *buckling* hingga berpengaruh pada patahnya *pull rod*.

2.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan data awal dari kondisi aktual yang terjadi pada komponen *pull rod* yang mengalami kegagalan mulai dari data dimensi dan data operasi.



Gambar 4. Dimensi *original pull rod*

Tabel 1. Data operasi *vertical mill atox 32.5*

No	Data Operasi	Nilai
1.	<i>Load grinding roller</i>	45760 kg
2.	<i>Load hub type 3</i>	15297 kg
3.	<i>Pressure</i>	60 bar
4.	<i>Piston diameter</i>	350 mm

2.4. Spesifikasi Material

Dimana jenis material yang digunakan pada komponen *pull rod*, mengacu pada penelitian sebelumnya yang menggunakan material 34MoCr *alloy steel*. Spesifikasi material *pull rod* seperti berikut,

Tabel 2. Spesifikasi material *pull rod*

No	Properties	Nilai
1.	<i>Density</i>	7.85 g/cc
2.	<i>Ultimate Tensile Strengs</i>	1100 - 1200 Mpa
3.	<i>Tensile Yield Strengs</i>	800 Mpa
4.	<i>Elongation at Break</i>	11%
5.	<i>Bulk Modulus</i>	160 GPa
6.	<i>Modulus of Elasticity</i>	205 GPa
7.	<i>Poissons Ratio</i>	0.29
8.	<i>Shear Modulus</i>	80.0 GPa

Sumber: Matweb.com

2.5. Perhitungan Gaya

Perhitungan dilakukan untuk mendapatkan besar gaya saat beroperasi atau proses penggilingan batubara dengan menggunakan data-data yang telah didapatkan. Dimana untuk menghitung gaya berat dari *grinding roller* yang bekerja saat beroperasi dapat menggunakan persamaan berikut,

$$F_W = m.g \tag{1}$$

Serta gaya yang bekerja pada sistem hidrolik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$F_{hidraulik} = P.A \tag{2}$$

2.6. Perhitungan Total Deformasi

Beban atau gaya terhadap benda yang terdeformasi adalah suatu gaya melakukan aksi terhadap benda padat sehingga menyebabkan terdeformasi. Sehingga nilai total deformasi perubahan panjang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\delta = \frac{F.L}{A.E} \tag{3}$$

2.7. Perhitungan Buckling Stress

Beban kritis merupakan gaya minimal yang diberikan untuk kolom yang tergantung pada penempatannya disebut beban tekuk *euler* [15]. Sehingga beban kritis dan tegangan kritis dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 . E . I}{L_e^2} \tag{4}$$

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} \tag{5}$$

Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai ϵ , teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai ϵ , yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi teori	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung						

Gambar 5. Faktor panjang efektif kolom [8]

Dari mekanika bahan telah diketahui bahwa batang tekan yang pendek dapat dibebani sampai beban melebihi (*inelastic*) dan batang tekan yang panjang akan tertekuk *elastic*. Dimana daerah tekuk *elastic* dan *inelastic buckling* dapat dicari sebagai berikut [5]:

Beban Nominal:

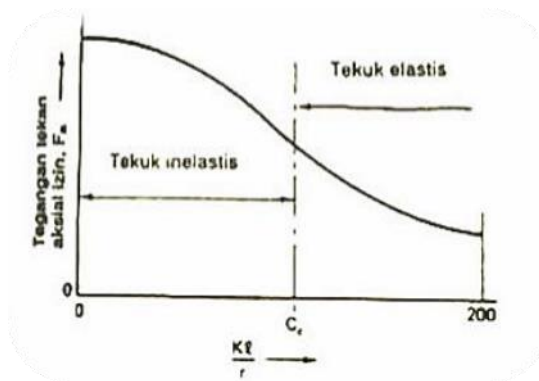
$$P_n = \sigma_{cr} \cdot A \tag{6}$$

Tekuk *Elastic*:

Jika, $KL/r > 4.71 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$
 Maka nilai: $\sigma_{cr} = 0,877 \cdot \sigma_e$ (7)

Tekuk *Inelastic*:

Jika, $KL/r \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$
 Maka nilai: $\sigma_{cr} = (0,658 \sigma_y / \sigma_e) \cdot \sigma_y$ (8)



Gambar 6. Hubungan tegangan kritis dan rasio kelangsingan (KL/r)

2.8. Prosedur Simulasi *Buckling*

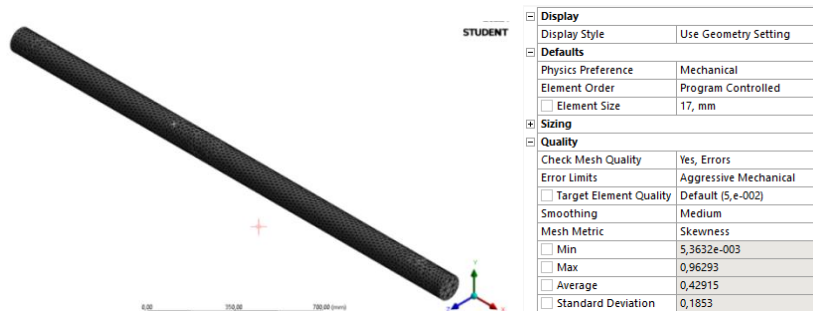
Tahapan langkah pembuatan model untuk dianalisa menggunakan metode elemen hingga dapat dijelaskan secara garis besar sebagai berikut:

1. Pembuatan desain awal struktur menggunakan *software autodesk inventor*
2. Pemilihan metode analisis *static structural & eigenvalue buckling*
3. Penentuan jenis material dan *property* yang digunakan pada tahap *engineering data*
4. Memasukkan desain awal struktur yang telah dibuat pada tahap *geometry*
5. Menampilkan desain awal struktur di *software ansys* pada tahap *model*

6. Pemilihan jenis *meshing* dan pembuatan elemen dari desain yang telah dibuat pada tahap *model*
7. Penentuan *remote displacement* bagian atas dan bawah struktur pada tahap *model static structural*
8. Penentuan *remote force* bagian atas untuk kondisi pembebanan pada tahap *model static structural*
9. Pemilihan nilai total deformasi *static structural* dan *eigenvalue buckling* pada tahap *solution*
10. Menjalankan simulasi dan melakukan analisa dari hasil simulasi pada tahap *results*

2.9. Meshing

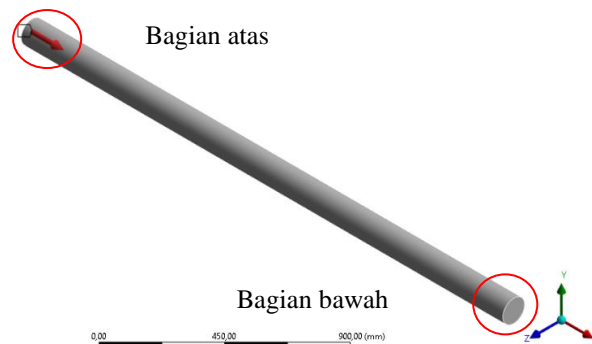
Meshing element yang digunakan dalam penelitian ini adalah *tetrahedron*. Adapun aturan praktis yang digunakan secara umum untuk menilai kualitas *mesh* berdasarkan *skewenes*, nilai *skewenes* yang diizinkan dibawah 0,75 termasuk dalam kategori *fair* sehingga jika nilainya mendekati 0 kualitas *element* yang dihasilkan akan semakin baik [16]. Sedangkan nilai *skewenes* dapat dilihat pada *average skewenes* sebesar 0,42915 dengan kualitas baik (*good*) seperti gambar dibawah,



Gambar 7. Bentuk dan kualitas *meshing*

2.10. Kondisi Batas (*boundary condition*)

Kondisi batas dalam menahan translasi ketiga sumbu (x,y,z) dan rotasi sepanjang kolom, sedangkan arah rotasi vertikal disumbu momen inersia diijinkan. Pada tumpuan bagian bawah gerakan dibatasi untuk membuat struktur stabil, sedangkan tumpuan di bagian atas. Gerakan arah x pada tumpuan atas dibiarkan bebas supaya pengaruh beban terhadap struktur elemen bisa terlihat, yang menggunakan *remote displacement* untuk membatasi gerakan struktur sedangkan *remote force* pada bagian atas untuk memberi kondisi pembebanan pada sumbu x ke arah bawah seperti panah merah pada gambar berikut,



Gambar 8. Kondisi batas struktur *pull rod* bagian atas dan bawah

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan Gaya *Pull Rod*

Perhitungan gaya dilakukan untuk mendapatkan gaya yang dihasilkan dengan menentukan data-data yang telah didapatkan, dimana hasil perhitungan gaya pada *grinding roller* dapat dihitung seperti persamaan (1) didapat nilai sebesar 99152,4 N dan *hub type 3* sebesar 49470,2 N sedangkan gaya pada sistem hidrolik dapat di hitung seperti persamaan (2) di dapat nilai sebesar 576975 N, dimana total gaya saat beroperasi sebesar 726097,6 N yang nantinya akan dimasukkan ke dalam *software ansys*.

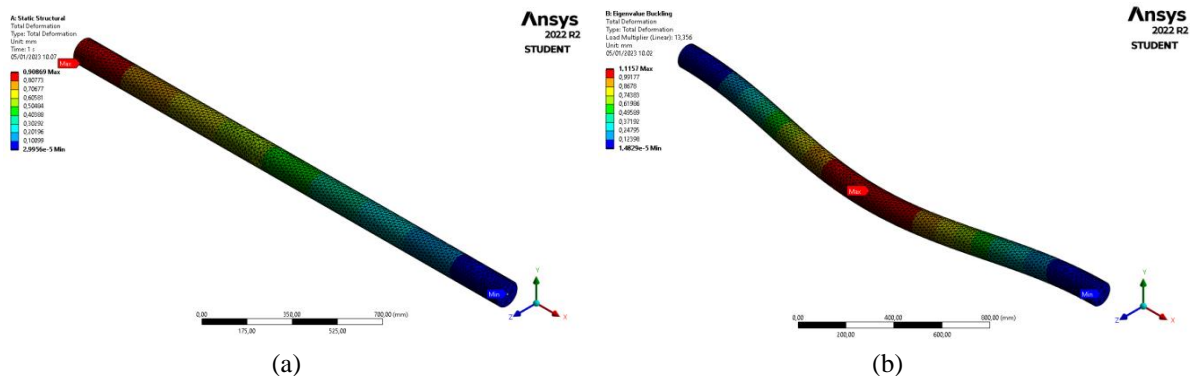
3.2. Hasil Perhitungan Teoritis

Dimana untuk menentukan total deformasi dan tegangan kritis dengan menggunakan luasan penampang (A) yang mengalami kegagalan di dapat nilai sebesar 0,0094985 m², sedangkan untuk momen inersia penampang di dapat nilai 7183240,625 mm⁴. Kemudian untuk menentukan total deformasi perubahan panjang dengan desain *original pull*

rod yang diakibatkan oleh gaya tekan dapat dihitung persamaan (3) di dapat nilai total deformasi 0,90911 mm. Selanjutnya hasil perhitungan secara teoritis menggunakan rumus *euler* seperti persamaan (4) di dapat nilai beban kritis sebesar 9770710,84 N dengan menggunakan faktor penempatan jepit-jepit.

3.3. Hasil Simulasi Jepit-Jepit

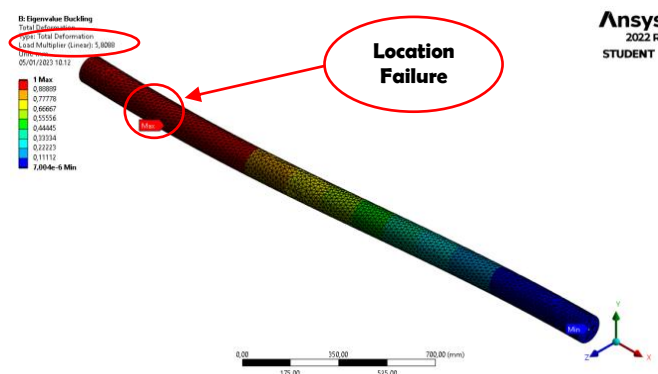
Metode simulasi khususnya pada tahap *setup* pilih *toolbar* dengan analisis *static structural* lalu *insert* klik *remote displacement* kemudian pilih ujung *pull rod* bagian atas pada penampang *pull rod*, kemudian *setting* secara beruntut X,Y,Z mulai dari: *coordinate system*: -2438, 0, 0 mm, *component*: free, 0, 0 mm, *rotation*: free, 0, 0 mm. Selanjutnya pada *remote displacement* yang kedua pada bagian ujung bawah dapat di *setting* X,Y,Z secara beruntut mulai dari: *coordinate system*: 2438, 0, 0 mm, *component*: 0, 0, 0 mm dan *rotation*: 0, 0, 0 mm. Selain itu juga perlu menentukan bagian yang terkena gaya atau pembebanan yaitu pada *remote force* dibagian atas *pull rod* dengan *setting* X,Y,Z secara beruntut mulai dari: *coordinate system*: -2438, 0, 0 mm, *component*: 726097.6, 0, 0 N. Sehingga di dapat nilai total deformasi 0,90869 dan *load multiplier* 13,356 dengan nilai beban kritis sebesar 9697759,5 N seperti gambar berikut,



Gambar 9. Hasil (a) Total deformasi (b) *Load multiplier* jepit-jepit

3.3. Hasil Simulasi Sesuai Kegagalan

Hasil simulasi berdasarkan lokasi kegagalan yang terjadi dengan metode simulasi yang berbeda, dilakukan khususnya pada tahap *setup* dengan cara pilih *support* pada *toolbar* lalu *insert* klik *remote displacement* pertama pilih sisi bagian atas *pull rod* kemudian *setting* secara beruntut X,Y,Z mulai dari *coordinate system*: -2438, 0, 0 mm, *component*: free, 0, 0 mm dan *rotation*: free, free, 0 mm. Kemudian pada *remote displacement* yang kedua pada sisi bagian bawah *pull rod* dapat di *setting* X,Y,Z secara beruntut mulai dari: *coordinate system*: 2438, 0, 0 mm, *component*: 0, 0, 0 mm dan *rotation*: 0, 0, 0 mm. Selanjutnya perlu menentukan bagian yang terkena gaya atau beban pada bagian atas *pull rod* dengan *setting* X,Y,Z secara beruntut mulai dari *coordinate system*: -2438, 0, 0 mm dan *component*: 726097.6, 0, 0 N. Maka hasil simulasi nilai *load multiplier* sebesar 5,8088 dan beban kritis sebesar 9697759,5 N seperti gambar berikut,



Gambar 10. Hasil simulasi sesuai lokasi kegagalan

3.4. Hasil Analisa Sesuai Kegagalan

Selanjutnya sebelum melakukan analisa *buckling*, untuk menghitung nilai rasio kelangsingan dari *pull rod* berdasarkan sesuai lokasi kegagalannya, perlu menentukan nilai K secara teoritis dengan cara melakukan beberapa

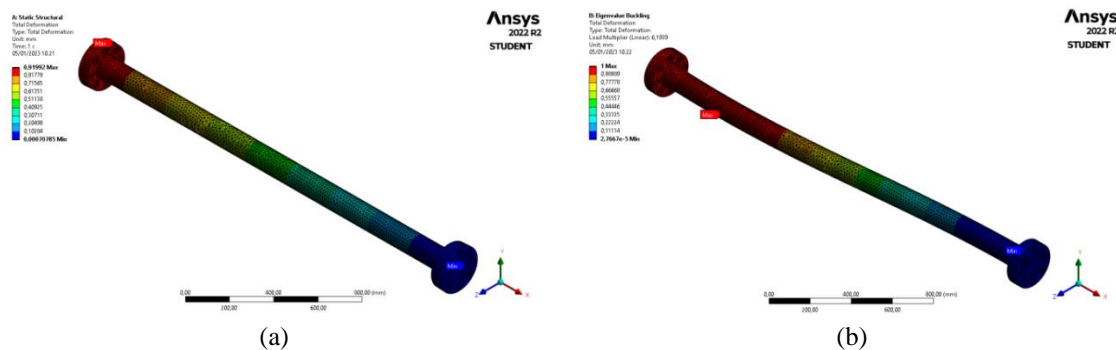
percobaan dengan menghitung beban kritis menggunakan rumus *euler* dapat dihitung dengan persamaan (4) dengan nilai K yang berbeda mulai dari 0,7 sampai 0,8, sehingga di dapat hasil seperti tabel dibawah ini,

Tabel 3. Hasil perhitungan beban kritis

No	Nilai Konstanta (K)	Beban kritis
1.	0,72	4711955,45 N
2.	0,74	4460697,05 N
3.	0,76	4229012,65 N
4.	0,78	4014920,62 N
5.	0,8	3816683,92 N

Selanjutnya tahap perbandingan dari hasil percobaan perhitungan teoritis dengan simulasi dilakukan untuk mengetahui nilai K yang sesuai dengan hasil simulasi dari beberapa hasil perhitungan dengan rumus *euler* yang didapat nilai K 0,76 dengan akurasi nilai 0,2%. Selanjutnya dapat dihitung tegangan kritisnya seperti persamaan (5) sebesar $445229526,34 \text{ N/m}^2$. Kemudian dapat dilakukan analisa berdasarkan lokasi kegagalan yang terjadi dilihat dari kurva hubungan tegangan kritis dan rasio kelangsingan seperti gambar 7. sehingga didapat nilai rasio kelangsingan (KL/r) sebesar 67,3. Kemudian didapat nilai batas tekuk *elastic* (C_c) sebesar 66,7 sehingga *pull rod* atau kolom bisa dikatakan mengalami kondisi tekuk *elastic* (*elastic buckling*).

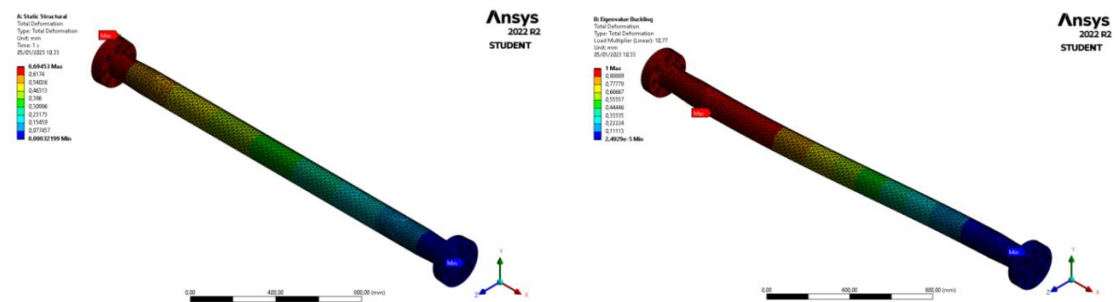
Kolom dengan kondisi *elastic buckling* maka untuk mencari kekuatan tekan nominal untuk menghitung tegangan kritisnya dapat dihitung menggunakan persamaan (7) yang di dapat nilai sebesar $390466294,6 \text{ N/m}^2$. Sehingga kekuatan nominal yang mampu ditahan oleh kolom atau *pull rod*, dapat dihitung menggunakan persamaan (6) sebesar 3708844,09 N. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan gaya 726097,6 N menggunakan analisis *static structural* dan *eigenvalue buckling* dengan bentuk *original pull rod* yang lebih kompleks, hasil simulasi nilai total deformasi 0,91992 mm dan *load multiplier* 6,1939 sehingga nilai beban kritisnya sebesar 4497375,9 N seperti berikut,



Gambar 11. Desain *original pull rod* (a) total deformasi (b) *load multiplier*

3.5. Hasil Simulasi Variasi Modifikasi *Pull Rod*

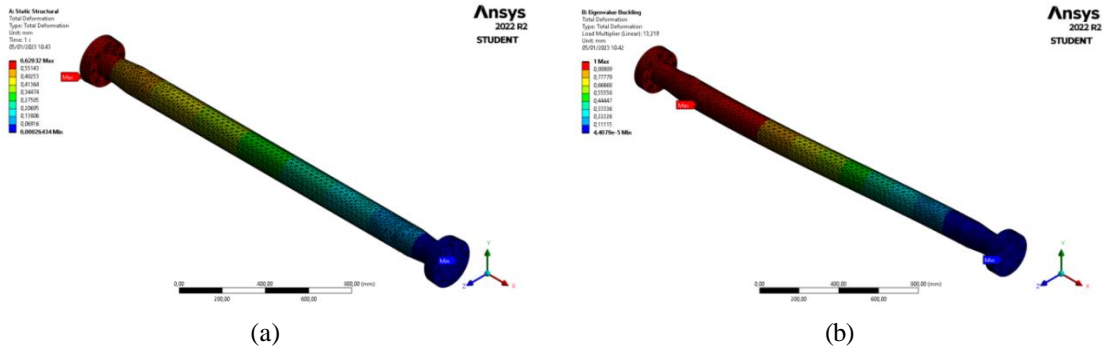
Dimana penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kegagalan yang terjadi akibat *buckling* dengan cara memodifikasi *pull rod*, dari hasil enam variasi modifikasi *pull rod* untuk mengetahui kekuatan struktur yang baik dalam menahan beban atau gaya yang bekerja akibat dari kegagalan *buckling*. Modifikasi pertama yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara memperbesar ukuran diameter *shaft pull rod* menjadi 130 mm, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,69453 mm dan *load multiplier* 10,77 sehingga nilai beban kritis sebesar 7820071,1 N seperti berikut,



(a) (b)

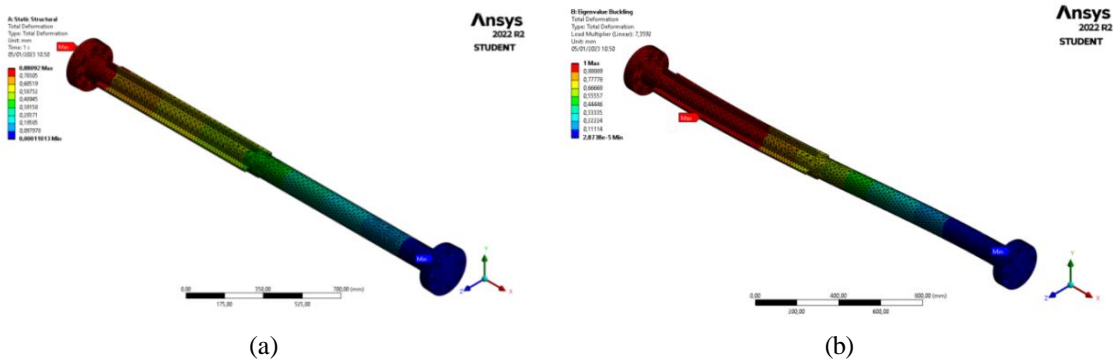
Gambar 12. Modifikasi pertama (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Modifikasi kedua yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara memperbesar ukuran diameter *shaft pull rod* menjadi 140 mm, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,62032 mm dan *load multiplier* 13,219 sehingga nilai beban kritis sebesar 9598284,1 N seperti berikut,



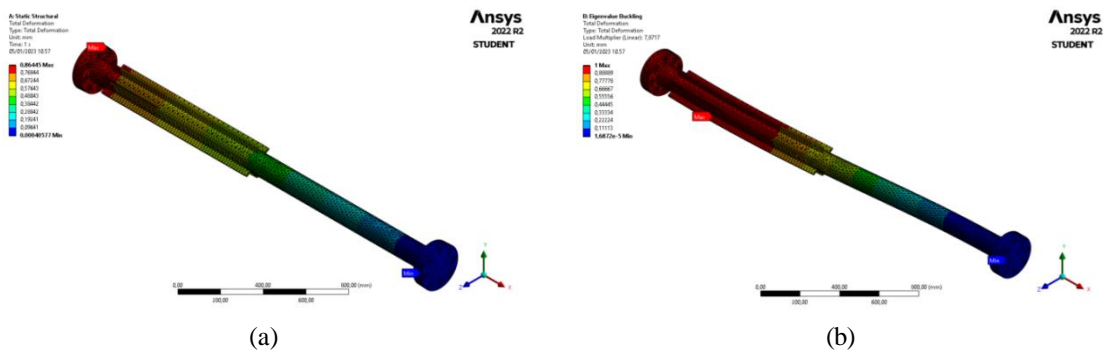
Gambar 13. Modifikasi kedua (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Modifikasi ketiga yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara menambahkan empat plat pada daerah kritis *pull rod* yang mengalami patah menjadi dua bagian dengan panjang plat 1000 mm dan tebal plat 10 mm, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,88092 mm dan *load multiplier* 7,3592 sehingga nilai beban kritis sebesar 5343497,4 N seperti berikut,



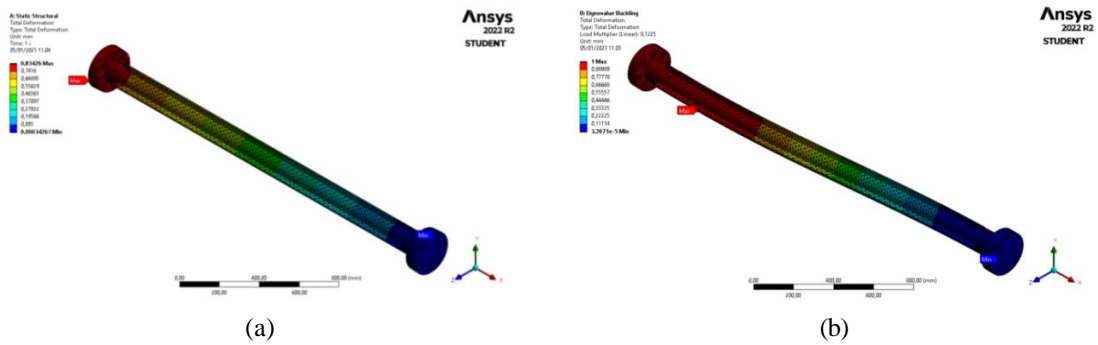
Gambar 14. Modifikasi ketiga (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Modifikasi keempat yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara menambahkan enam plat pada daerah kritis *pull rod* yang mengalami patah menjadi dua bagian dengan panjang plat 1000 mm dan tebal plat 10 mm, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,86445 mm dan *load multiplier* 7,8717 sehingga nilai beban kritis sebesar 5715622,4 N seperti berikut,



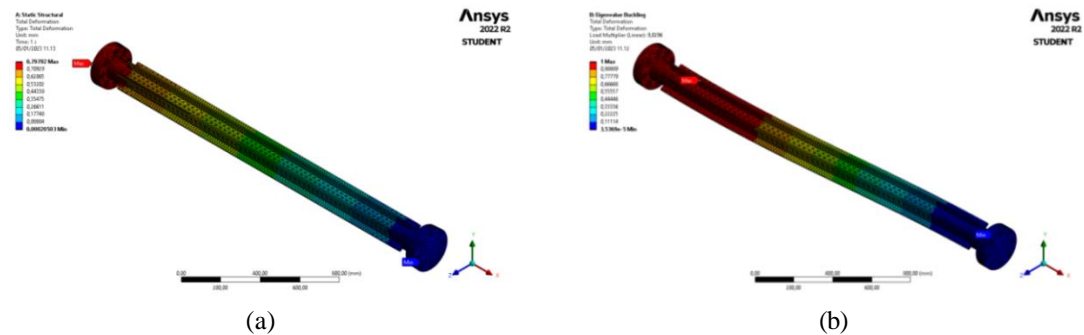
Gambar 15. Modifikasi keempat (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Modifikasi kelima yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara menambahkan empat plat pada *shaft pull rod* sepanjang 2118 mm dengan tebal plat 10 mm pada *shaft pull rod* yang mengalami *buckling*, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,83426 mm dan *load multiplier* 8,1125 sehingga nilai beban kritis sebesar 5890466,7 N seperti berikut,



Gambar 16. Modifikasi ke lima (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Modifikasi ke enam yang dilakukan pada *pull rod* dengan cara menambahkan enam plat pada *shaft pull rod* sepanjang 2118 mm dengan tebal plat 10 mm pada *shaft pull rod* yang mengalami *buckling*, sehingga hasil simulasi dengan gaya 726097,6 N di dapat nilai total deformasi 0,79792 mm dan *load multiplier* 9,0296 sehingga nilai beban kritis sebesar 6556370 N seperti berikut,



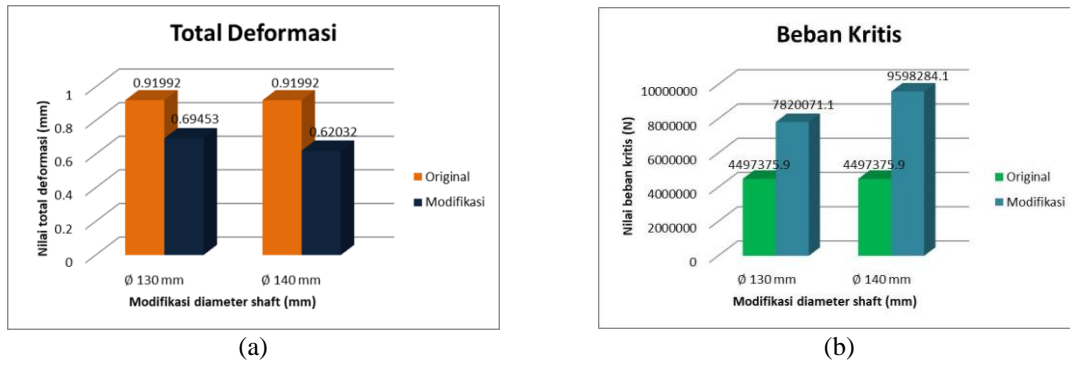
Gambar 17. Modifikasi ke empat (a) total deformasi (b) *load multiplier*

Tabel 4. Rekapitulasi nilai total deformasi dan beban kritis

No	Modifikasi	Deformasi	<i>Load Multiplier</i>	Beban Kritis
1.	<i>Original shaft</i> Ø110	0,91992 mm	6,1939	4497375,9 N
2.	<i>Modif shaft</i> Ø130	0,69453 mm	10,77	7820071,1 N
2.	<i>Modif shaft</i> Ø140	0,62032 mm	13,219	9598284,1 N
3.	<i>Modif plat</i> 4	0,88092 mm	7,3592	5343497,4 N
4.	<i>Modif plat</i> 6	0,86445 mm	7,8717	5715622,4 N
5.	<i>Modif full plat</i> 4	0,83426 mm	8,1125	5890466,7 N
6.	<i>Modif full plat</i> 6	0,79792 mm	9,0296	6556370 N

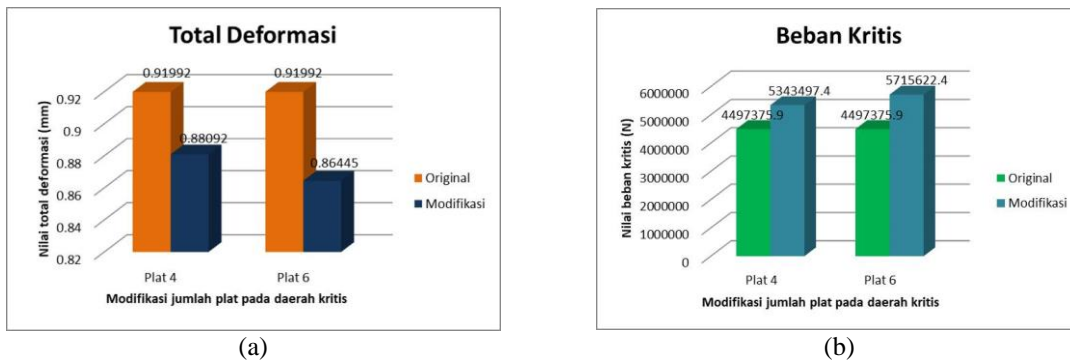
3.6. Pembahasan Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi *static structural* dan *eigenvalue bucling* yang di dapat nilai total deformasi dan *load multiplier* serta beban kritis, mulai dari desain *original* dan enam variasi modifikasi *pull rod* dari hasil simulasi yang terjadi pada *pull rod* memiliki nilai yang berbeda disetiap variasi modifikasinya seperti perbandingan pada grafik berikut,



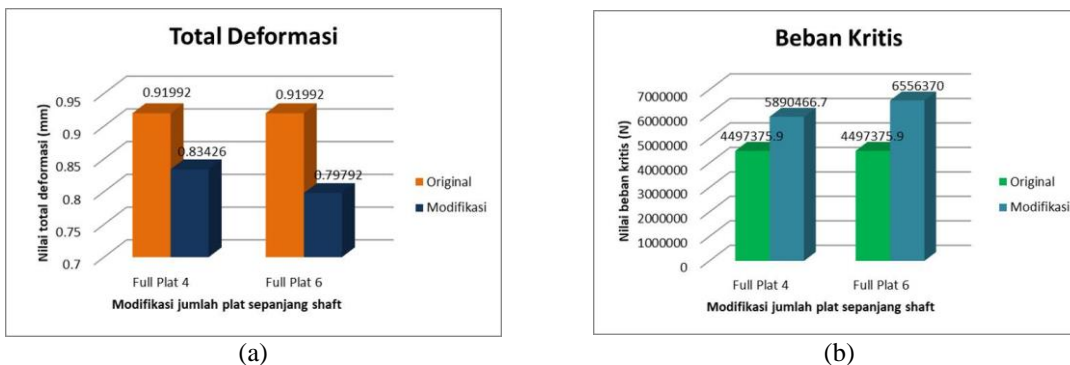
Gambar 18. Grafik perbandingan modifikasi diameter *shaft* (a) Total deformasi (b) Beban kritis

Berdasarkan grafik perbandingan nilai total deformasi dan beban kritis seperti gambar 18 diatas dari hasil uji simulasi mulai dari desain *original* di dapat nilai total deformasi 0,91992 mm dan beban kritis sebesar 4497375,9 N yang dapat dibandingkan dengan hasil modifikasi diameter *shaft* 130 mm yang di dapat nilai total deformasi 0,69453 mm dan beban kritis sebesar 7820071,1 N sedangkan dari hasil modifikasi diameter *shaft* 140 mm di dapat nilai total deformasi 0,62032 mm dengan nilai beban kritis sebesar 9598284,1 N.



Gambar 19. Grafik perbandingan modifikasi jumlah plat (a) Total deformasi (b) Beban kritis

Berdasarkan grafik perbandingan nilai total deformasi dan beban kritis seperti gambar 19 diatas dari hasil uji simulasi mulai dari desain *original* di dapat nilai total deformasi 0,91992 mm dan beban kritis sebesar 4497375,9 N yang dapat dibandingkan dengan hasil modifikasi jumlah empat plat pada bagian yang mengalami kegagalan pada *shaft pull rod* di dapat nilai total deformasi 0,88092 mm dan beban kritis sebesar 5343497,4 N sedangkan dari hasil modifikasi jumlah enam plat pada bagian yang mengalami kegagalan di dapat nilai total deformasi 0,86445 mm dan beban kritis sebesar 5715622,4 N.



Gambar 20. Grafik perbandingan modifikasi jumlah *full* plat (a) Total deformasi (b) Beban kritis

Berdasarkan grafik perbandingan nilai total deformasi dan beban kritis seperti gambar 20 diatas dari hasil uji simulasi mulai dari desain *original* di dapat nilai total deformasi 0,91992 mm dan beban kritis sebesar 4497375,9 N yang dapat dibandingkan dengan hasil modifikasi jumlah empat *full* plat sepanjang 2118 mm pada *shaft pull rod* di dapat nilai total deformasi 0,88092 mm dan beban kritis sebesar 5343497,4 N

sedangkan dari hasil modifikasi jumlah enam *full* plat sepanjang 2118 mm pada *shaft pull rod* di dapat nilai total deformasi 0,86445 mm dan beban kritis sebesar 5715622,4 N.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil dan pembahasan dari studi analitik dan simulasi *buckling*, maka penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan dari hasil perhitungan yang di dapat total gaya yang bekerja pada *pull rod* yang menyebabkan kegagalan sebesar 726097,6 N.
- b. Hasil simulasi menggunakan desain *original pull rod* berdasarkan lokasi kegagalan yang terjadi menunjukkan nilai total deformasi 0,91992 mm dan nilai beban kritis sebesar 4497375,9 N.
- c. Hasil analisa *buckling stress* pada *pull rod* berdasarkan lokasi kegagalan yang terjadi menunjukkan *pull rod* mengalami kondisi tekuk *elastic*.
- d. Berdasarkan hasil simulasi variasi modifikasi *pull rod* rekomendasi yang dapat dilakukan dengan memperbesar *shaft pull rod* 140 mm dengan nilai total deformasi terkecil 0,62032 mm dan nilai beban kritis sebesar 9598284,1 N.
- e. Hasil simulasi berdasarkan lokasi kegagalan yang terjadi menunjukkan modifikasi diameter *shaft* 140 mm dapat digunakan untuk mengatasi kegagalan, yang terjadi pada *original pull rod* sebelum dimodifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. A. Saputra, Saffaruddin, and M. L. Franca, "Analisa Roller Crusher Untuk Mereduksi Ukuran Bahan Galian Tanah Liat Di Pt . Semen Baturaja (Persero) Tbk .," no. July, 2021.
- [2] D. A. Setiawati, "Kajian Eksperimental Kasus Tekuk Komponen Struktur Kolom Dengan Menggunakan Baja," vol. 1, pp. 1–10, 2017.
- [3] B. Karakkunnummal, "A Case Study of a Pull Rod Failure in ATOX Raw Grinding," vol. 3, no. 2, pp. 90–103, 2015, doi: 10.17706/ijmse.2015.3.2.90-103.
- [4] M. S. Hendriyanto, "Analisa Struktur Rangka Mesin 3 In 1 Pembuat Kerupuk Semier Dengan Menggunakan Software Ansys Workbench 14.0," pp. 1–80, 2015.
- [5] B. Banusha and E. Desmaliana, "Analisis Numerik Tekuk Kolom Variasi Penampang Profil Baja Tunggal," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 3, p. 157, 2021, doi: 10.26760/rekaracana.v7i3.157.
- [6] M. Syahrudin, H. Yudo, and W. Amiruddin, "Studi Buckling pada Tangki Kargo Muatan Gas Cair Tipe Bilobe Berbasis Metode Elemen Hingga," *J. Tek. ...*, vol. 5, no. 4, pp. 752–757, 2017, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/18833>.
- [7] A. Sapei, M. A. Sahbana, and SURIANSYAH, "Pengaruh Variasi Diameter Kolom Dengan Tumpuan Jepit-Jepit Terhadap Buckling Baja ST 42," vol. 5, no. 3, pp. 11–17, 2013.
- [8] M. T. Paskah, S. O. Dapas, and H. Manalip, "Studi Kuat Tekan Kolom Baja Profil Kanal U Ganda Dengan Variasi Jarak Antar Profil," *J. Sipil Statik*, vol. 7, no. 3, pp. 329–336, 2019.
- [9] D. Stevens and L. S. Tediato, "Analisis Pengaruh Panjang Elemen Terhadap Kuat Tekan Dari Baja Ringan Profil Kanal Dengan Metode Elemen Hingga," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 1, no. 1, p. 159, 2018, doi: 10.24912/jmts.v1i1.2253.
- [10] A. Sandjaya and B. Suryoatmono, "Studi Eksperimental Batang Tekan Baja Canai Dingin Diperkaku Sebagian," *J. Tek. Sipil*, vol. 25, no. 1, p. 19, 2018, doi: 10.5614/jts.2018.25.1.3.
- [11] A. P. Sari, A. P. Rahamadi, and S. A. Kristiawan, "Studi Eksperimental Tekuk Lokal Batang Baja Ringan Canai Dingin," *J. Ris. Rekayasa Sipil*, vol. 3, no. 1, p. 16, 2019, doi: 10.20961/jrrs.v3i1.34720.
- [12] H. C. Sezgen, A. Cakan, and M. Tinkir, "Linear Buckling Analysis Of Cylinder Rods Used On Industrial 300 TONS H-Type Hydraulic Press," no. August, pp. 4–7, 2017.
- [13] E. Didik, Mardjuki, and Jumiadi, "Analisa pengaruh deformasi plastis terhadap struktur mikro dan kekerasan pada baja St 42," *Transmisi*, vol. 11, no. 1, pp. 19–26, 2015, [Online]. Available: <https://jurnal.unmer.ac.id/index.php/jtmt/article/view/4536/pdf>.
- [14] R. L. Mott, E. M. Vavrek, and J. Wang, *Machine Elements in Mechanical Design 6th Edition*. 2018.
- [15] W. Iskandar, I. Sujana, and M. Taufiqurrahman, "Studi Experiment Uji Buckling Dengan Variasi Tumpuan Dan Material Benda Uji," vol. 2, no. 2, pp. 159–165, 2021.
- [16] M. S. T. S. Utomo, E. Yohana, and R. Halim, "Analisis Hidrodinamika di dalam Circulating Fluidized Bed Boiler Berdasarkan Perubahan Waktu Menggunakan CFD," vol. 10, no. 3, pp. 301–314, 2022.