

ANALISA TEKUK KRITIS PADA PIPA BERBENTUK SEGI EMPAT YANG DIKENAI BEBAN *BENDING* DENGAN VARIASI PENAMPANG VERTIKAL

Lukfandi¹, Hartono Yudo¹, Wilma Amirudin¹

¹S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Email: fandiundipl1@yahoo.co.id

Abstrak

Pada konstruksi baja permasalahan yang sangat penting adalah mengenai stabilitas, dikarenakan komponen struktur baja rentan terhadap tekuk akibat pembebanan yang melebihi kapasitasnya sehingga terjadi ketidakstabilan pada struktur baja. Terjadinya fenomena tekuk pada struktur baja disebabkan karena elemen baja pada umumnya sangat tipis, sehingga mudah mengalami tekuk yang akan mengurangi kapasitas dari struktur itu sendiri. Pada permasalahan ini penelitian yang dilakukan adalah pada pipa segi empat dengan variasi bentuk dan masing-masing panjang dan tebal yang berbeda yaitu $L/a = 10,15,20$, $a/t = 5,10,15$, dan $a/b = 0.5,0.25,0,125$ yang dikenai beban *bending*. Pada kenyataan benda uji tersebut akan mengalami tekuk lentur dan terjadi ketidakstabilan akibat pembebanan gaya. Setelah memperoleh data hasil apa yang dianalisa, dapat disimpulkan semakin besar nilai deformasi, momen buckling yang terjadi semakin kecil dan yang akhirnya akan konstan
Kata Kunci : Pipa segi empat Berongga, Beban tekuk, beban elastis

Abstract

in the steel construction is a very important issue regarding the stability, because the component of steel structures susceptible to buckling due to load that exceeds its capacity, causing instability in the structure of the steel. The occurrence of the phenomenon of buckling of steel structures due to steel elements are generally very thin, so it's easy to buckle that will reduce the capacity of the structure sendiri. pada this issue of the research is on the pipe with a rectangular shape variations and each long and thick ie different $L / a = 10,15,20$, $a / t = 5,10,15$, and $a / b = 0.5,0.25,0,125$ subjected to bending loads. In fact the test specimen will buckle bending and instability due to the imposition of force. After obtaining the results of what the data is analyzed, it can be concluded the greater the value of deformation, buckling moment that increasingly smaller and eventually will be constant

Keywords: Pipes rectangular Hollow, Burden buckling, elastic load

1. PENDAHULUAN

Baja adalah salah satu bahan konstruksi yang paling penting, sifat – sifatnya yang terutama dalam penggunaan konstruksi adalah kekuatannya yang tinggi dan sifat yang keliatannya. Keliatannya (*ductility*) adalah kemampuan untuk berdeformasi secara nyata baik dalam tegangan maupun dalam kompresi sebelum terjadi kegagalan { Joseph E. Bowles, 1985 }.

Buckling (tekuk) pada baja terjadi akibat penekanan pada suatu batang dimana yang mengalami gaya tekan aksial. Dalam hal ini, tekuk dapat terjadi sebelum atau sesudah tegangan dicapai terlebih dahulu, tentu tidak menjadi masalah dalam perhitungan kekuatan baja. Namun apabila tekuk terjadi sebelum tegangan idiil dicapai, tentu akan sangat berbahaya karena

peristiwa tekuk terjadi secara tiba-tiba tanpa memberi tanda-tanda misalnya terjadinya deformasi secara perlahan-lahan yang semakin lama semakin besar

Pipa segi empat dapat dikategorikan berdasarkan panjangnya yaitu pipa segi empat pendek dan pipa segi empat panjang. Pipa segi empat pendek adalah jenis pipa segi empat yang kegagalannya di tentukan berupa kegagalan material (kekuatan material). Pipa segi empat panjang adalah pipa segi empat yang kegagalannya ditentukan oleh tekuk (*buckling*) yang disebabkan oleh ketidakstabilan. Tekuk (*buckling*) adalah suatu jenis kegagalan yang disebabkan oleh ketidakstabilan suatu elemen struktur yang dipengaruhi oleh aksi (beban tekuk). Beban tekuk adalah beban yang dapat

menyebabkan suatu pipa segi empat menekuk, beban ini disebut PCR ($PCR = \Pi^2 EI/L^2$).

Dalam kondisi ujung elemeng struktur juga dapat mempengaruhi besarnya beban tekuk yang juga berkaitan dengan panjangnya pipa segi empat atau berupa variasi bentuknya suatu pipa segi empat section.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pipa segi empat Section

Pipa segi empat merupakan batang tekan tegak yang bekerja untuk menahan balok-balok dan sebagainya yang untuk seterusnya akan melimpahkan semua beban tersebut ke pondasi. [1].

Batang ini pada hakekatnya jarang sekali mengalami tekanan aksial saja. Apabila sebuah batang lurus di bebani gaya tekan aksial dengan pemberian beban semakin lama semakin tinggi, maka pada batang tersebut akan mengalami perubahan. Perubahan dari keadaan sumbu batang lurus menjadi sumbu batang melengkung dinamakan tekuk. [1]

2.2 Elastik Tekuk

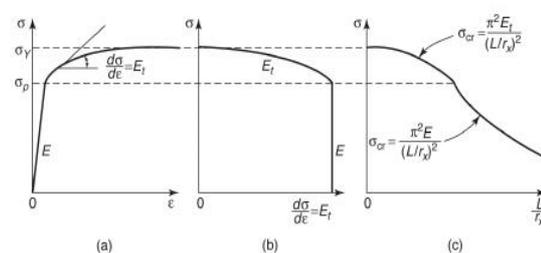
Analisis tekuk elastik pada dasarnya adalah hasil pengembangan analisa elastik linier. Hanya saja dalam elastik tekuk, pengaruh gaya aksial terhadap kekakuan lentu elemen diperhitungkan. Untuk memahami apa yang dimaksud, ada baiknya dibayangkan instrumen gitar. Tali senar dianalogikan sebagai elemen struktur yang ditinjau. Jika kondisi tali senar yang tidak dikencangkan (tidak ada gaya tarik) maka tali secara fisik terlihat kendur (tidak kaku) bahkan ketika dipetik, tidak ada perlawanan (senar mengikuti arah petikan). Tetapi jika sebaliknya, ketika tali senar telah dikencangkan, maka secara fisikpun kondisinya berbeda. Tali senar akan terlihat sangat kaku, dapat dipetik dan menimbulkan dentingan nada. Besarnya pengencangan (gaya tarik) mempengaruhi frekuensi nada (kekakuan). Semakin kaku maka frekuensi nadanya semakin tinggi, dan sebaliknya. Perilaku elemen struktur, yang seperti tali senar (langsung), tidak dapat ditangkap dengan analisis struktur elastis – linier yang biasa. Analogi tali senar menunjukkan bahwa gaya aksial tarik (positif) akan meningkatkan kekakuan lentur

elemen struktur. Demikian juga sebaliknya, gaya aksial tekan (negatif) dapat mengurangi kekakuan. Bahkan untuk elemen dengan kategori langsung, gaya aksial tekan yang besar dapat menghilangkan kekakuan struktur secara keseluruhan, kondisi ini disebut tekuk (*buckling*). [3]

Pada tekuk elastis, besarnya deformasi pada struktur sebelum tekuk tidak berpengaruh atau tidak diperhitungkan. Dalam hal ini, kondisi geometri struktur dianggap sama seperti pada kondisi elastis linier, dimana deformasi yang terjadi dianggap relatif kecil, sehingga dapat diabaikan. Padahal tekuk adalah permasalahan stabilitas, yang sangat dipengaruhi oleh deformasi, oleh karena itu tekuk elastis hanya cocok digunakan pada struktur yang langsing dan tidak bergoyang, dimana keruntuhan tekuk yang terjadi sifatnya tiba-tiba dan tidak didahului oleh terjadinya deformasi yang besar. Kondisi ini tentunya saja terjadi pada setiap jenis struktur, nilai yang dihasilkan dari ini akan memberikan batas atas dari beban tekan yang dapat diberikan. Kondisi aktual bisa lebih kecil.

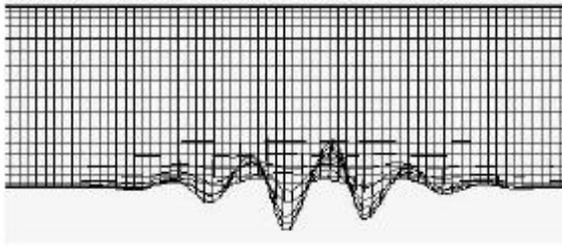
2.3 Elastis Orde ke -2

Jika deformasinya relatif besar sedemikian sehingga konfigurasi geometri berubah, maka hasil menjadi tidak valid. Kasusnya menjadi non linier geometri, berikut contoh elastis modulus



Gambar 1. Elastic modulus tangensial [3]

yang biasa dipakai akan memberikan hasil yang tidak tepat. Untuk mengatasi, penyelesaiannya harus memasukan pengaruh deformasi struktur. Lebih kompleks dibanding elastik linier, untuk itu umumnya perlu iterasi dan tahapan beban. Oleh sebab itu strukturnya disebut sebagai struktur orde ke -2, istilah lain yang sepadan adalah non linier geometri. Berikut contoh *buckling* pada model.

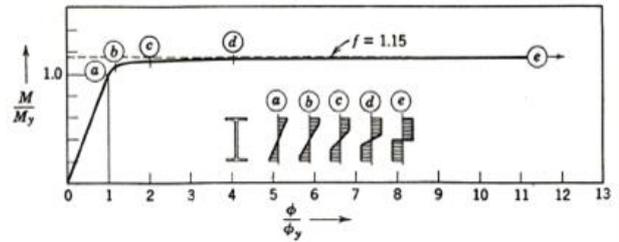


Gambar 2. Buckling pada model [4]

Dalam praktek, kelangsingan *Pipa segi empat* yang ada ternyata menyebabkan tekuk terjadinya pada kondisi inelastis, sehingga teori Euler tidak tepat lagi digunakan. Pada kondisi inelastis kekakuan *Pipa segi empat* menjadi berkurang. Itu bisa terjadi karena sifat nonlinier bahan materialnya (kualitas bahan), juga akibat adanya penampang yang telah mengalami leleh terlebih dahulu akibat tegangan residu tekan (negatif) dari proses pembuatannya. Perilaku pasca tekuk *Pipa segi empat* kondisi inelastis berbeda sekali dibandingkan *Pipa segi empat* kondisi elastis (Euler). Itu yang menyebabkan mengapa hasil uji empiris *pipa segi empat* banyak yang menunjukkan kapasitas yang lebih kecil dibandingkan hasil perhitungan rumus Euler. Itu menjadi pemicu Enggeser untuk mempublikasikan teori *Tangent Modulus* di tahun 1889. Teori itu masih didasarkan anggapan *Pipa segi empat* yang lurus sempurna (*perfectly Straight*), yang adanya secara teoritis saja. Perbedaan teori *Tangent Modulus* dengan Euler adalah pada kondisi inelastisnya saja. Keduanya berguna untuk penyusunan kurva tegangan kritis *Pipa segi empat* (elastis-plastis) yang dapat menunjukkan seberapa besar tegangan yang menyebabkan kondisi *bifurcation* terhadap kelangsingannya. [3]

2.4 Plastik Tekuk

Pada balok baja dengan profil kompak dan tahanan lateral yang cukup, ketika dibebani terus secara bertahap maka bagian penampang yang mengalami momen maksimum, serat terluar akan mencapai tegangan leleh atau *yielding* (titik a pada gambar 2). Jika beban terus ditambahkan, besarnya tegangan tidak bertambah, tetapi bagian yang mengalami leleh merambat ke serat bagian dalam. Lama-lama tegangan di keseluruhan penampang akan mencapai leleh atau kondisi plastis (titik e digambar 2)



Gambar .3 . Hubungan momen dan kurvature pada penampang baja profil WF (Beedle 1958)

Jika baloknya menerus atau struktur statis tak tentu, dengan cara yang sama maka pada bagian yang mengalami momen maksimum akhirnya juga akan mengalami sendi plastis. Meskipun demikian hal itu tidak serta menyebabkan kondisi mechanism, karena ketika beban ditambahkan, struktur masih mampu menerimatambahan beban tanpa memperlihatkan terjadinya deformasi yang besar. Adanya penambahan beban akan didistribusikan ke bagian elemen lain yang belum mengalami leleh. Jika beban terus ditambahkan, kondisinya menjadi berulang seperti sebelumnya (gambar 2) dan akhirnya sendi plastis yang baru akan terbentuk. Setelah cukup banyak sendi plastis yang terbentuk maka pada akhirnya struktur akan mengalami kondisi mechanism juga dan akhirnya runtuh.[2]

Parameter penentu kekuatan *pipa segi empat*

Setelah mempelajari sejarah : siapa, kapan dan bagaimana rumus –rumus kekuatan *pipa segi empat* telah disusun, maka perlu mengetahui juga parameter yang telah ketahui selain panjang *Pipa segi empat*, yang akan mempengaruhi kekuatannya. Kalau panjang *Pipa segi empat* jelas, karena menentukan kelangsingan *Pipa segi empat*. Adapun parameter lainnya (Bjorhovde 1988), adalah :

1. Mutu baja
2. Metode pembuatan *Pipa segi empat*
3. Ukuran Penampang
4. Bentuk Penampang
5. Sumbu Lentur
6. Besarnya cacat – bengkokan yang ada

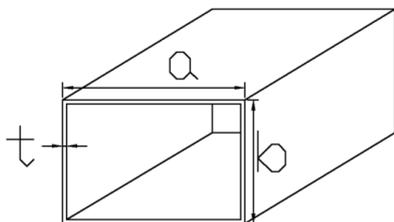
7. Kondisi kekangan ujung tumpuan Pipa segi empat

Pengaruh mutu baja, bentuk penampang dan sumbu lentur ketika terjadi tekuk telah dipahami juga, sebaiknya tidak dibahas lagi. Adapun metode pembuatan Pipa segi empat (temperatu saat penggilasan, kondisi pendinginan, proses membuat lurus elemen, properti logam juga bentuk profil penampang) akan menentukan besar dan distribusi tegangan residu maksimum pada penampangnya.[3]

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Data Model

Pengambilan data Pipa segi empat atas rekomendasi dari dosen pembimbing. Data pendukung lainnya diambil dari internet dan buku yang sudah ada.



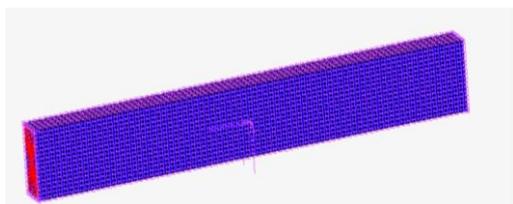
Gambar 4. model pipa segi empat 3D

keterangan:

$$a/b = 0,5, 0,25, 0,125$$

$$a/t = 5, 10, 15$$

$$l/a = 10, 15, 20$$



Gambar 5. Pipa segi empat dimodelkan dengan MSC Marc

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan pembebanan

1. Pembebanan Kritis

$$M_{cr} = I \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \frac{t}{r}$$

Penentu Kondisi Batas

4.1 Hasil Analisa

Tabel 1. Kondisi Batas

lokasi titik independen	translasi		
	sumbu x	sumbu y	sumbu z
titik independen pada atas dan bawah	fix	-	fix
titik independen pada kanan dan kiri	fix	fix	-
	rotasi		
titik independen pada atas dan bawah	-	-	-
titik independen pada kanan dan kiri	-	-	-

4.2 Validasi Model

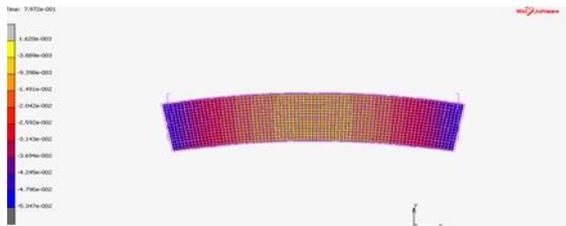
Untuk dapat dikatakan mendekati benar maka persentase validitasnya harus dibawah 5% agar nilai tersebut dapat dikatakan valid. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pada perhitungan manual [1] dengan hasil perhitungan *software*.

Model	Perhitungan	3.64E-07	99.4
	Software	3.62E-07	

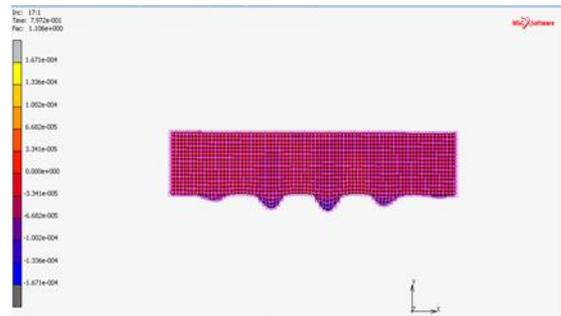
Untuk rumus menggunakan rumus defleksi maksimum yaitu :

$$\vartheta_{max} = \frac{ml^2}{2EI}$$

Sumber : buku mekanika teknik, E.P. Popov, hal 628



Gambar 6 deformasi pada model



Gambar 7. Buckling pada model

Analisa untuk model dengan $a/t=5$

Model 1

Untuk analisa elastic didapatkan deformasi maksimum sebesar 3.188 cm dengan momen *buckling* sebesar 8.33×10^6 Nm

Untuk analisa elasto-plastis didapatkan nilai deformasi sebesar 0.009 cm dengan momen buckling 1.99×10^5 Nm

Model 10

Untuk analisa elastic didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1.087 cm dengan momen *buckling* sebesar 1.28×10^7 Nm

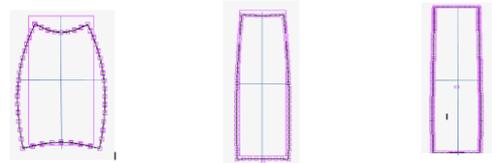
Untuk analisa elasto-plastis didapatkan nilai deformasi sebesar 0.053 cm dengan momen buckling 6.02×10^5

Model 19

Untuk analisa elastic didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 0.161 cm dengan momen buckling sebesar 2.01×10^7

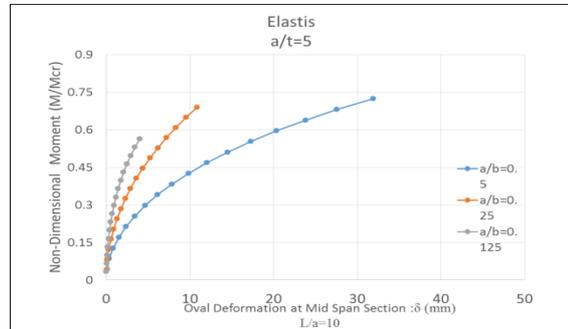
Tabel 2. Momen buckling (Elastis)

Model	Mb/Mcr (Elastis)	Mcr	Mb
1	0.7231	1.15E+07	8.33E+06
10	0.6892	1.87E+07	1.28E+07
19	0.5627	3.22E+07	2.01E+07



Model 1 Model 10 Model 19

Gambar 8. Deformasi pada tengah model (elastis)

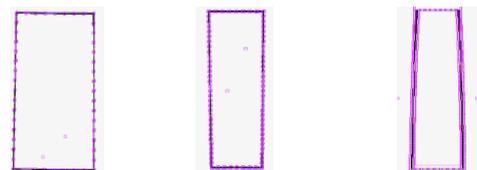


Gambar 9. Oval deformasi elastis $a/t=5$

Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil a/b atau semakin tinggi bentuk pipa segi empat maka semakin kecil pula nilai deformasi yang di alami namun semakin besar nilai momen *buckling* yang di terimanya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 8. Perbedaan oval deformasi pada mid-span untuk tiap model

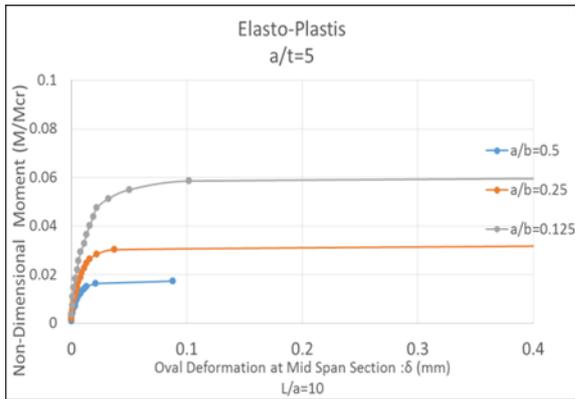
Tabel 3. Momen buckling (Elasto-plastis)

Model	Mb/Mcr (Elasto-plastis)	Mcr	Mb
1	0.0173	1.15E+07	1.99E+05
10	0.0322	1.87E+07	6.02E+05
19	0.0625	3.22E+07	2.01E+06



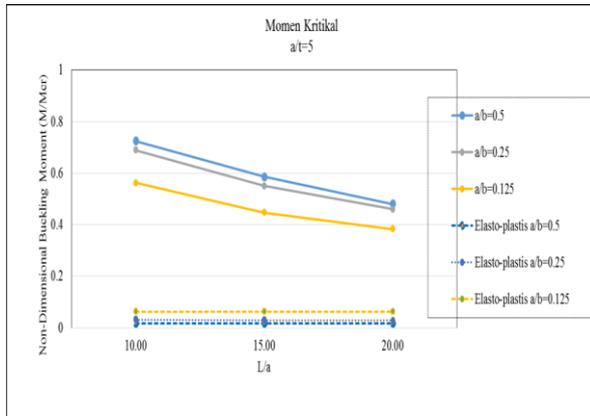
Model 1 Model 10 Model 19

Gambar 10. Deformasi pada tengah model (elasto-plastis)

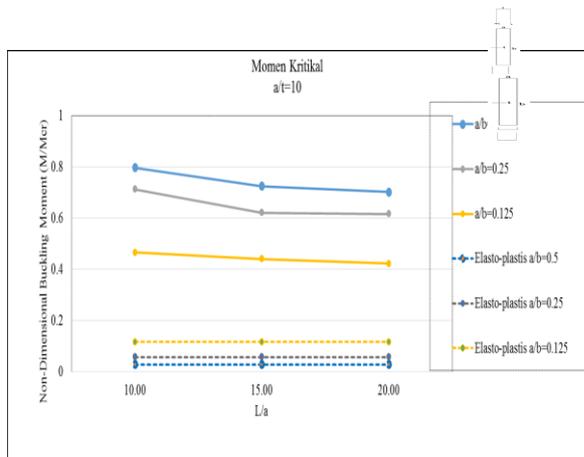


Gambar 11. Oval deformasi elastoplastis $a/t=5$

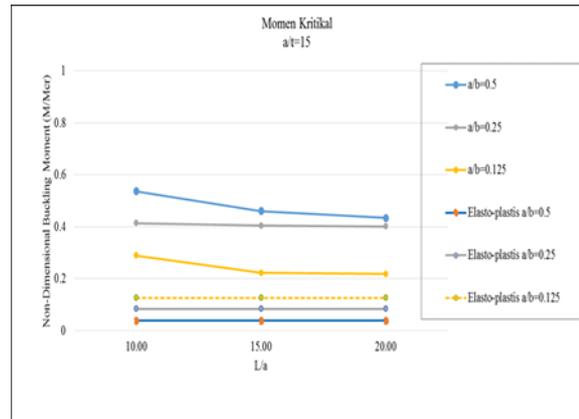
Menerangkan bahwa model di analisa dalam kondisi elasto-plastis dengan menambahkan nilai yield stress sebesar 250 Mpa. Dari grafik tampak bahwa momen buckling sama. Hal ini disebabkan karena momen buckling dibatasi oleh *yield stress*/



Gambar 12. Buckling momen $a/t = 5$



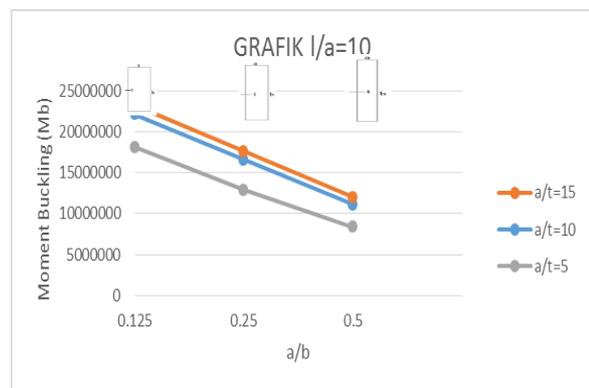
Gambar 13. Buckling momen $a/t=10$



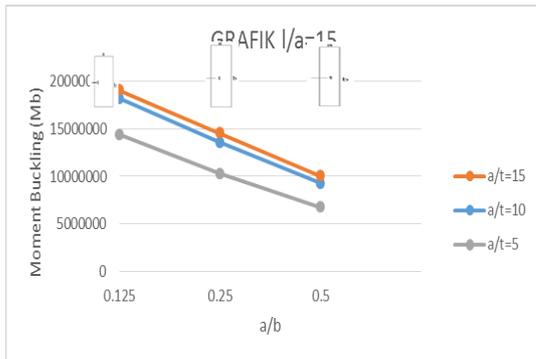
Gambar 14. Buckling momen $a/t=15$

Menunjukkan hubungan antara momen buckling yang terjadi dengan nilai a/t untuk masing-masing model. Untuk model sifat elastis, a/b yang paling rendah memiliki momen buckling yang lebih besar daripada a/b yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh besarnya nilai deformasi yang didapatkan akan mengurangi nilai momen *buckling*. Maka semakin kecil nilai deformasi maka akan semakin besar nilai momen *buckling* yang didapatkan.

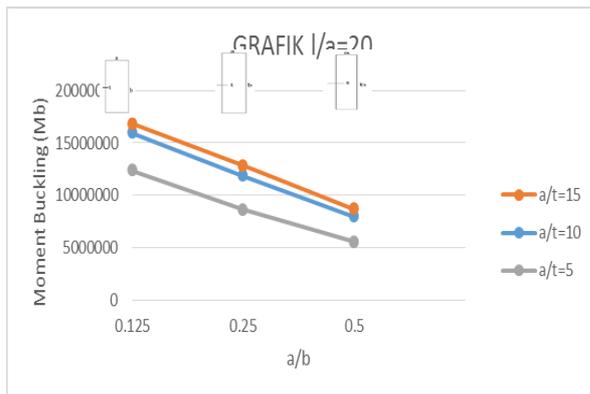
Untuk model dengan sifat elasto-plastis, nilai momen *buckling* hamper konstan untuk masing-masing model. Hal ini disebabkan oleh nilai maksimum momen bending yang digunakan dibatasi oleh *yield stress*.



Gambar 15. Perbandingan Momen Buckling dengan a/b , $l/a=10$



Gambar 16. Perbandingan Momen Buckling dengan a/b, l/a=15



Gambar 17. Perbandingan Momen Buckling dengan a/b, l/a=20

Grafik diatas. menunjukkan hubungan antara momen buckling yang terjadi dengan nilai a/b untuk masing-masing model. Untuk model sifat elastis, model a/b yang lebih rendah memiliki momen buckling yang lebih besar daripada a/b yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh besarnya nilai deformasi yang didapatkan akan mengurangi nilai momen buckling. Maka, semakin besar nilai deformasi maka semakin kecil nilai momen buckling yang didapatkan. Semakin dari model variasi vertical atau model tersebut memiliki bentuk yang tinggi ke variasi horizontal atau model tersebut semakin kecil/pipih maka untuk nilai momen buckling nya juga akan semakin kecil.

5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Dengan bertambahnya tinggi tiang model dengan kenaikan 0.25 m atau besarnya a/b, momen *buckling* yang terjadi semakin besar.

Hal ini disebabkan oleh semakin kecilnya deformasi yang terjadi seiring dengan bertambahnya tinggi model. Nilai momen buckling akan semakin bertambah seiring bertambah tinggi suatu model.

1. Untuk analisa elasto-plastis, nilai momen buckling yang terjadi lebih kecil dari model yang bersifat elastis. Hal ini disebabkan oleh momen yang terjadi pada tiang dibatasi oleh yield stress.
2. Untuk perbandingan antara a/t dengan l/a didapatkan semakin besar nilai a/t maka nilai momen buckling akan semakin kecil, sebaliknya dengan perbandingan a/b dengan l/a didapatkan nilai a/b semakin kecil dan semakin vertical suatu model maka semakin kecil nilai deformasi pada model dan nilai momen buckling akan semakin besar

5.2 Saran

1. Perlu pendalaman untuk analisa buckling dengan menambahkan berbagai jenis sifat material
2. model yang digunakan untuk dianalisa buckling tidak hanya terbatas pada tinggi dan tebal
3. model sudah diteliti dapat diaplikasikan atau diuji sesuai lapangan dan aturan yang berlaku

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Popov, E.P., 1978. *Mechanics of Material, 2nd Edition*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- [2] Sunggono K.H, 1984. "*Buku Teknik sipil*", Penerbit Nova,
- [3] Wiryanto Dewobroto. 2013. "*Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000*", Lumina Press .Jakarta.
- [4] Yudo, Hartono., Takao Yoshikawa. 2014. "Buckling phenomenon for straight and curved pipe under pure bending". *Journal of Marine and Science Technology*. 95.