

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

Yudya Saddita Rokhim¹, Hartono Yudo¹, Wilma Amirudin¹
¹S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Email: yudyarokhim@gmail.com

Abstrak

Pipa tidak hanya berbentuk lingkaran memanjang ada jenis pipa yang tidak kalah berguna, yaitu pipa segi empat. Berfungsi untuk penguat konstruksi, pipa segi empat sangat dibutuhkan. Sebuah konstruksi dengan pipa ini membutuhkan dua dasar, yaitu kekuatan dari desain konstruksinya dan kekuatan material pipa itu sendiri. Kekuatan struktur pada pipa segi empat sangat penting dalam suatu konstruksi. Salah satu kegagalan struktur yang sering terjadi pada pipa segi empat adalah *buckling* atau tekuk. Dan sudah diketahui bahwa momen *buckling* yang terjadi dapat dikurangi dengan menambahkan panjang pada pipa segi empat. Penyebab terjadinya *buckling* bisa bermacam-macam, salah satunya adalah kondisi pembebanan. Penelitian ini akan membahas tentang perubahan *cross-sectional oval deformation* pipa segi empat divariasikan horizontal menjadi 27 macam dengan model *principle* $a/b = 1, 2, 4$; $a/t = 15, 10, 20$; $l/a = 10, 15, 20$ menggunakan momen *bending*. *Buckling* dianalisa menggunakan metode elemen hingga, mempertimbangkan sifat material pada pipa yaitu *elastis* dan *elasto-plastis*, serta deformasi yang terjadi pada setiap pipa. Semakin pipih pipa yang di mana semakin besar nilai a/b , maka semakin kecil terjadinya deformasi. Tetapi, dengan semakin besar nilai deformasi, momen *buckling* yang terjadi semakin besar dan yang akhirnya akan konstan.

Kata Kunci: Pipa Segi Empat, *Buckling*, *Bending*, Deformasi, Elastis, *Elasto-plastis*

Abstrac

Not only the that circle elongated, There's a type of the pipe that no less useless, that pipe is The hollow square pipe. The pipe purpose to lasing a construction, the hollow square pipe much needed. A construction with the hollow square pipe requiring two basic, namely the power design of the construction and power material pipe it self. The power structure on the hollow square pipe very important in a construction. One of the failure of a structure that often occurs in the hollow square pipe is buckling. And already known that moment buckling happened can be reduced by adding long on the hollow square pipe. The authors intend to lift it. This study will discuss the changes in cross-sectional the oval deformation, the model is varied horizontally into 27 kinds of models principle $a/b = 1, 2, 4$; $a/t = 15, 10, 20$; $l/a = 10, 15, 20$ using a bending moment. Analysis of buckling using the elements up to consider the nature of the material on the, which is an elastic and elasto-plastis, as well as deformations happened at any pipe. The more flattened pipe is where the greater the value of a/b , then the lesser the deformations. But, with the greater the value of deformations, a moment buckling happened increasingly large and that would eventually constant. It is caused also because of the value of the moments that different in every models.

Keyword: Hollow square Pipe, *Buckling*, *Bending*, Deformation, Elastic, *Elasto-plastic*

1. PENDAHULUAN

Dua kemungkinan kerusakan pada berbagai mesin yaitu cara kerjanya (*system error*) dan kerusakan dari material itu sendiri salah satunya karena mengalami beban secara berkala dan mengalami tekuk (*buckling*). Kerusakan material saat terkena *buckling* sulit di ketahui karena terjadi secara tiba – tiba, bisa di ketahui dengan cara meneliti lebih dalam material tersebut.

Baja adalah salah satu bahan konstruksi yang paling penting, sifat – sifatnya yang terutama dalam penggunaan konstruksi adalah kekuatannya yang tinggi dan sifat yang keliatannya. *Ductility* (Keliatannya) adalah kemampuan untuk deformasi secara nyata baik dalam tegangan maupun dalam kompresi sebelum terjadi kegagalan [1].

Baja mengalami banyak kondisi saat di lapangan, baja dikatakan kuat apabila sudah di uji dengan berbagai kondisi. Sebuah konstruksi di sebut aman apabila kemampuan maksimal baja itu sendiri telah diketahui. *Buckling* terjadi akibat penekanan pada suatu batang dimana mengalami deformasi dalam kasus ini mengalami gaya tekan aksial. *Buckling* dapat terjadi sebelum atau sesudah tegangan maksimal dicapai terlebih dahulu, tidak menjadi masalah jika terjadinya *buckling* setelah tegangan maksimal . Namun apabila *buckling* terjadi sebelum tegangan maksimal dicapai, tentu akan sangat berbahaya karena peristiwa *buckling* terjadi secara tiba-tiba. Hal tersebut membuat riset tentang kekuatan baja tersebut sangat dibutuhkan terutama untuk merancang konstruksi dari pipa segi empat.

Struktur rangka dengan batang pipa segi empat berongga telah sering digunakan pada konstruksi di atap rumah, tiang jembatan, kereta api, crane, konstruksi daerah pelabuhan, konstruksi *offshore* (lepas pantai), dan konstruksi gedung. Contoh tipikal dari konstruksi di lepas pantai maupun pelabuhan adalah pada selubung untuk tiang pancang, lengan untuk anjungan *crane*, dan *funnel*

(balok cerobong asap). Sedangkan untuk konstruksi di daratan, pipa segi empat berongga ini digunakan untuk rangka atap, rangka batang, dan struktur ruang. Keunggulan yang menonjol dari batang dengan pipa segi empat berongga adalah kaitannya dengan perilaku batang mengalami *buckling* dua arah dan terutama lebih kuat saat mengalami puntir.

Penulis merasa penting untuk menganalisa hal tersebut dan mencoba menganalisa *buckling* pada pipa segi empat dengan menggunakan variasi *horizontal*. Pipa segi empat akan dimodelkan menggunakan MSC Patran dan analisa *non-linear* akan dibantu MSC Marc (Mentat).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pipa segi empat merupakan batang tekan tegak yang bekerja untuk menahan balok-balok. Rangkaian pipa segi empat yang selanjutnya menjadi konstruksi yang kemudian akan melimpahkan semua beban tersebut ke pondasi dan pipa itu sendiri. Serta pipa segi empat tersebut akan mendapat berbagai gaya termasuk *buckling*.

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 deformasi atau perubahan bentuk. Deformasi dari keadaan sumbu batang lurus menjadi sumbu batang melengkung dinamakan *buckling*.

Pada hakekatnya batang yang hanya memikul tekan aksial saja jarang dijumpai dalam struktur ataupun konstruksi, namun bila pembebanan diatur sedemikian rupa hingga pengekangan (*restrain*) rotasi ujung dapat diabaikan atau beban dari batang-batang yang bertemu diujung pipa segi empat bersifat simetris dan pengaruh lentur sangat kecil dibandingkan dengan tekanan langsung maka

batang tekan dapat direncanakan dengan aman sebagai pipa segi empat yang dibebani secara konsentris.

Dari mekanika bahan diketahui bahwa hanya pipa segi empat yang sangat pendek dapat dibebani hingga mencapai tegangan lelehnya, sedangkan keadaan yang umum yaitu lenturan mendadak akibat ketidakstabilan terjadi sebelum kekuatan batang sepenuhnya tercapai keadaan demikian yang kita sebut dengan buckling atau tekuk.

Untuk menentukan kekuatan pipa segi empat dasar, kondisi pipa segi empat perlu beri beberapa anggapan mengenai bahan, kita dapat menganggap:

1. Sifat tegangan – regangan tekan sama diseluruh titik pada penampang
2. Tidak ada tegangan internal seperti akibat pendinginan setelah penggilingan (*rolling*)
3. Pipa segi empat lurus sempurna dan *prismatic*
4. Beban bekerja melalui sumbu pusat batang sampai batang mulai mengalami *oval deformation*.
5. Kondisi tengah harus statis tertentu sehingga panjang antara kedua ujung ekuivalen.
6. Teori lendutan yang kecil seperti pada lenturan yang umum berlaku dan gaya geser dapat di abaikan.
7. Puntiran dan distorsi pada penampang tidak terjadi selama lenturan

Analisa kekuatan sebuah struktur telah menjadi bagian penting dalam alur kerja pengembangan desain dan produk. Pada awalnya analisa kekuatan dilakukan dengan menggunakan rumusan-rumusan teoritis yang telah banyak tercantum pada buku-buku panduan mekanika struktur dan teknik. Tetapi hal tersebut memiliki banyak kekurangan, salah satunya adalah harusnya dilakukan penyederhanaan-penyederhanaan serta pengidealisan kondisi-kondisi yang akan dianalisa agar dapat dimasukkan ke dalam rumusan teoritis tersebut. Hal ini dapat menyebabkan berkurangnya akurasi dan

ketepatan hasil analisa yang dihasilkan serta akan sangat sulit diaplikasikan pada bentuk struktur yang kompleks.

Metode elemen hingga adalah sebuah metode yang menggunakan pendekatan numerik untuk menganalisa sebuah struktur untuk mendapatkan solusi pendekatan dari suatu permasalahan.

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

1. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisa.
2. Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut.
3. Pembuatan elemen dari hasil pemodelan geometri struktur yang akan dianalisa (*mesh generation*).
4. Pemberian kondisi batas (*constraint/boundary condition*).
5. Penentuan jenis material dan properti yang digunakan.
6. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*).
7. Analisa. [2]

Buckling atau penekukan dapat didefinisikan sebagai sebuah fenomena kegagalan yang terjadi akibat tekanan kompresif yang terjadi pada sebuah struktur sehingga menyebabkan terjadinya perubahan bentuk struktur tersebut berupa defleksi lateral ke bentuk kesetimbangannya yang lain. [3]

Buckling analisis adalah teknik yang digunakan untuk menentukan beban tekuk kritis beban di mana struktur menjadi tidak

stabil dan bentuk modulus melengkung bentuk karakteristik yang terkait dengan respon struktur yang melengkung.

Fenomena *buckling* dapat dibagi menjadi dua bagian: tekuk global dan tekuk lokal. Contoh khas tekuk global adalah seluruh struktur melengkung sebagai satu unit, sementara tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada elemen-elemen pelat. [4]

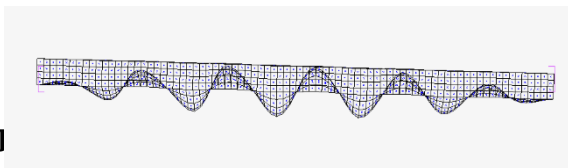
Nilai maksimum bending stress pada pipa segi empat akibat beban tekuk kritis dapat didapatkan dengan rumus nilai maksimum menurut Hartono Yudo dan Takao pada pipa lurus akibat beban tekuk kritis adalah: [5]

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

Pada perangkat lunak MSC Marc (Mentat), analisa buckling dibuat berdasarkan teori-teori yang telah disebutkan di atas. Tetapi pada perangkat lunak MSC Nastran hasil dari proses akhir tidaklah langsung berupa nilai beban kritis dari struktur yang dianalisa melainkan berupa nilai eigenvalue. Sehingga untuk mendapatkan nilai beban kritis nilai eigen tersebut harus dimasukkan ke dalam persamaan sederhana yakni:

$$P_{cr} = P_{applied} \times \text{Eigenvalue}$$

Oleh karena itu pada analisa dengan menggunakan perangkat lunak MSC Marc (Mentat) nilai eigen yang dihasilkan dapat juga diartikan sebagai besarnya faktor keamanan yang dimiliki oleh struktur tersebut.[6] Semakin kecil nilai eigen yang dihasilkan semakin besar kemungkinan terjadinya kegagalan akibat terjadinya *buckling*. Oleh karena itu nilai eigen yang besar cukup diharapkan pada analisa sebuah struktur untuk menunjukkan tingkat keamanan yang besar dari struktur tersebut dari kemungkinan terjadinya gagal akibat *buckling*.



Gambar 1. Contoh *Buckling*

Mekanika bahan kita tahu bahwa batang tekan yang pendek akan dapat dibebani sampai beban kelelahan. Batang tekan yang panjang akan runtuh akibat tekuk elastis. Pada keadaan umum kehancuran akibat tekan terjadi diantara keruntuhan akibat kelelahan bahan akibat tekuk elastis, setelah bagian penampang melintang kelelahan, keadaan ini disebut (*inelastic buckling*).

Ada 3 jenis keruntuhan, yaitu: [7]

1. Keruntuhan akibat tegangan yang terjadi pada penampang telah melalui materialnya
2. Keruntuhan akibat batang tertekuk *elastic (elastic buckling)*, keadaan ini terjadi pada bagian konstruksi yang langsung. Disini hukum Hooke yaitu gaya Hooke berbanding lurus dengan jarak pergerakan pegas dari posisi normalnya masih berlaku bagi serat penampang selagi tegangan yang terjadi tidak melebihi batas proporsional dan pipa segi empat akan kembali seperti semula jika tidak melewati titik elastisnya.
3. Keruntuhan akibat melelehnya sebagian serat disebut tekuk inelastis (*inelastic buckling*), kasus keruntuhan semacam ini berada di antara kasus (1) dan kasus (2), dimana pada saat menekuk sejumlah seratnya menjadi di inelastis, maka modulus elastisitasnya ketika tertekuk lebih kecil dari harga awalnya

2.1. Elastik Tekuk

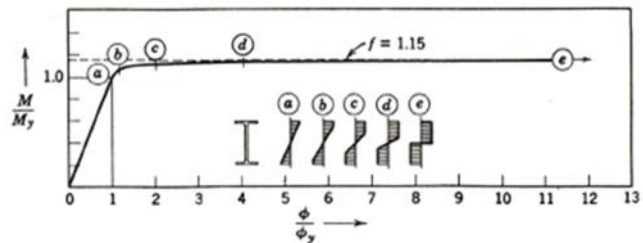
Analisis tekuk elastik pada dasarnya adalah hasil pengembangan analisa elastik linier. Hanya saja dalam elastis tekuk, pengaruh gaya aksial terhadap kekakuan lentu elemen diperhitungkan. Untuk memahami apa yang dimaksud, ada baiknya dibayangkan instrumen gitar. Tali senar dianalogikan

sebagai elemen struktur yang ditinjau. Jika kondisi tali senar yang tidak dikencangkan (tidak ada gaya tarik) maka tali secara fisik terlihat kendor (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 (gayatarik) 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*).[8]

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.

2.2. Plastis Tekuk

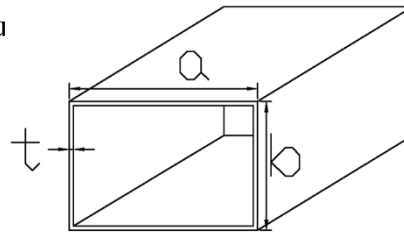
Pada balok baja dengan profil kompak dan tahanan lateral yang cukup, ketika dibebani terus secara bertahap maka bagian penampang yang mengalami momen maksimum, serat terluar akan mencapai tegangan leleh atau yielding. Jika beban terus ditambahkan, besarnya tegangan tidak bertambah, tetapi bagian yang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



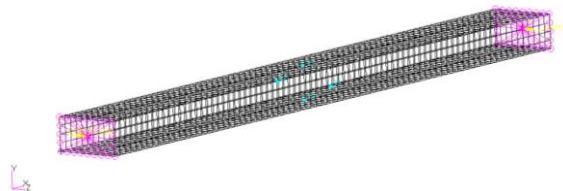
Gambar .2 . Hubungan momen dan kurvature pada penampang baja profil WF (Beedle 1958)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Materi penelitian yang a dalam penelitian ini melinuti data- data primer yang digu



Gambar 3 *Principle model*
 $a/b = 1, 2, 4$; $a/t = 15, 10, 20$; $l/a = 10, 15, 20$
 dengan $a = 0.1$ m



Gambar 4. Pipa Segi Empat Dimodelkan dengan MSC Patran

Bahan yang akan di analisa dengan software ini menggunakan bahan baja dengan kriteria material sebagai berikut:

Elastic modulus = 2.06e+011 N/m²
 Poisson ratio = 0.3
 Shear Modulus = 8e+010 N/m²
 Density = 7850 kg/m³

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perhitungan Pembebanan

Beban diberikan gaya aksial di tiap titik tengah ujung pipa segi empat berbeda pada setiap variasi model.

Pembebanan kritis di salah satu model :[5]

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

$$= \frac{1.73667E-06 \quad 2.06E+11 \quad 0.005}{1.652271 \quad 0.025}$$

$$= 1.73E+006 \text{ Nm}$$

4.2. Penentuan Kondisi Batas

Tabel 1. Kondisi Batas

lokasi titik independen	translasi		
	sumbu x	sumbu y	sumbu z
titik independen pada tengah <i>surface</i> atas	fix	-	fix
titik independen pada tengah <i>surface</i> samping	fix	fix	-
	rotasi		
titik independen pada tengah <i>surface</i> atas	-	-	-
titik independen pada tengah <i>surface</i> samping	-	-	-

4.3. Validasi Model

Model dikatakan mendekati benar, maka persentase validitasnya harus dibawah 5% agar nilai tersebut dapat dikatakan valid. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pada perhitungan manual [6] dengan hasil perhitungan *software* menjadikan model bisa di sebut ideal karena sesuai

perhitungan manualnya.

Perhitungan manual untuk validasi menggunakan rumus dari buku mekanika teknik karya popov [9]:

$$v \max = \frac{PL^3}{3EI}$$

Rumus di atas digunakan pada salah satu model sampel dan validasi yang di dapat di bawah 5% kemudian model berikutnya menyesuaikan pengaturannya dengan model yang telah divalidasi.

4.4. Hasil Analisa

❖ a/t = 10 dan l/a = 10

□ Model 4 (a/b = 1)

Nilai deformasi maksimum dari analisa elastik sebesar 27.03 mm dengan momen *buckling* sebesar 1.18E+006 Nm.

Nilai deformasi maksimum dari analisa *elasto plastis* sebesar 0.05 mm dengan momen *buckling* sebesar 3.70E+004 Nm.

□ Model 13 (a/b = 2)

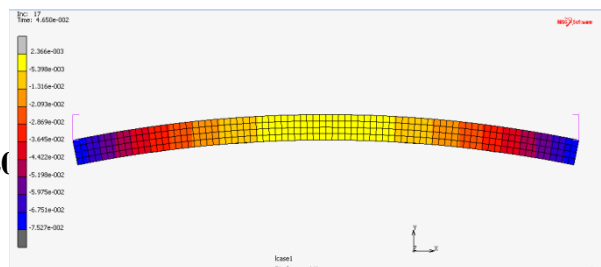
Nilai deformasi maksimum dari analisa elastik sebesar 16.26 mm dengan momen *buckling* sebesar 5.18E+005 Nm.

Nilai deformasi maksimum dari analisa *elasto plastis* sebesar 0.02 mm dengan momen *buckling* sebesar 1.54E+004 Nm.

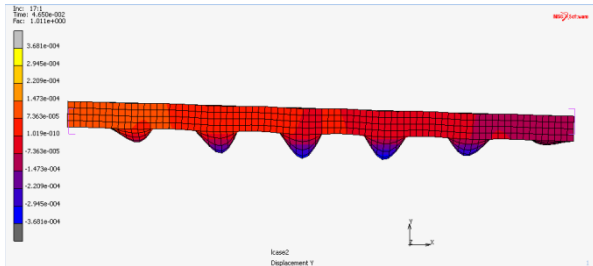
□ Model 22 (a/b = 4)

Nilai deformasi maksimum dari analisa elastik sebesar 2.57 mm dengan momen *buckling* sebesar 1.59E+005 Nm.

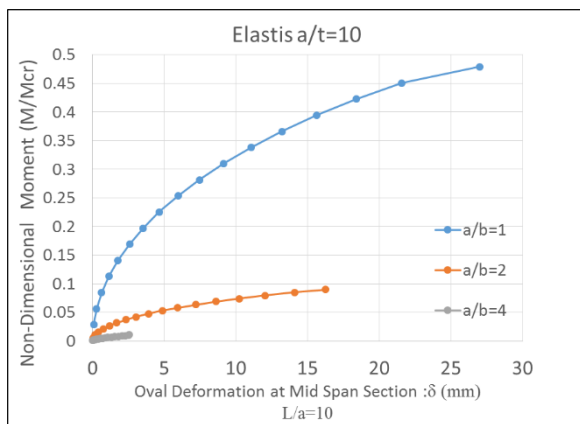
Nilai deformasi maksimum dari analisa *elasto plastis* sebesar 0.01 mm dengan momen *buckling* sebesar 6.71E+003 Nm.



Gambar 5. Deformasi pada pipa segi empat



Gambar 6. *Buckling* pada pipa segi empat



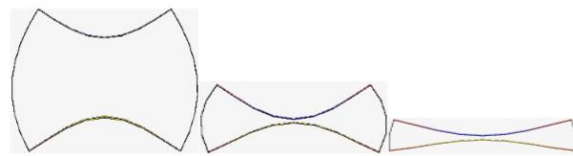
Gambar 7. Deformasi pada Tengah Pipa Segi Empat (Elastis)

Tabel 2. Momen *Buckling* (Elastis)

Pipa Segi Empat	Mb/Mcr (Elastis)	Mcr	Mb
Model 4	0.479	2.45E+006	11.75E+005
Model 13	0.09	5.76E+006	5.18E+005
Model 22	0.01063	14.92E+006	1.59E+005

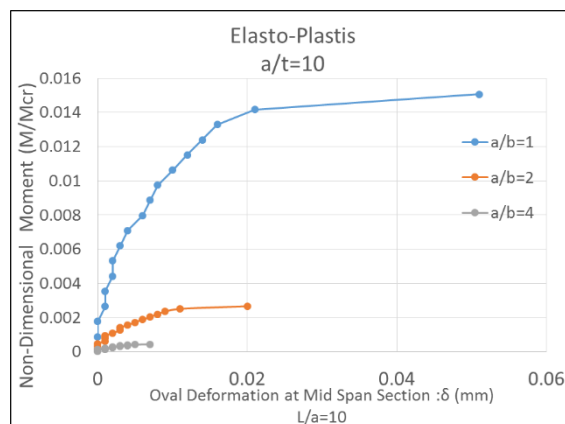
Pada pipa segi empat yang memiliki luas persegi (a/b) lebih besar mengalami nilai deformasi yang lebih besar pula. Sedangkan pada pipa segi empat yang memiliki nilai luas

persegi (a/b) lebih kecil seperti model 13 dan model 22 mengalami deformasi lebih kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin luas persegi (a/b) pada pipa segi empat dengan panjang dan tebal sama maka semakin besar deformasi yang dialami. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8. perbedaan oval deformasi pada *mid-span* untuk tiap pipa segi empat.



Model 4 Model 13 Model 22

Gambar 8. Oval Deformasi pada Tengah Pipa Segi Empat (Elastis)



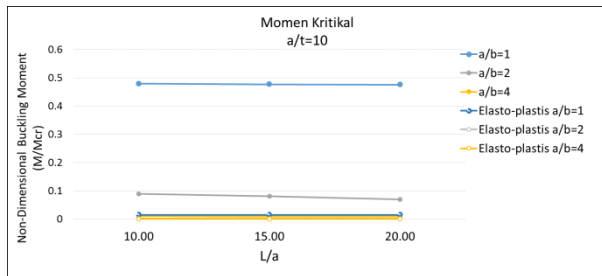
Gambar 9. Deformasi pada Tengah Pipa Segi Empat (Elasto-Plastis)

Tabel 3. Momen *Buckling* (Elasto-plastis)

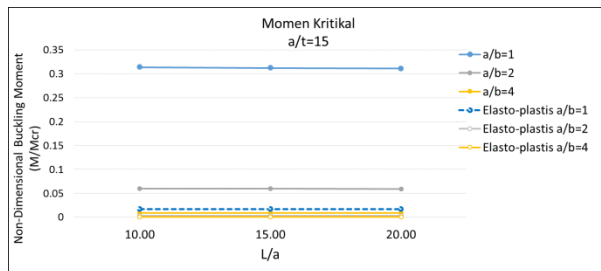
Pipa Segi EMpat	Mb/Mcr (Elasto-plastis)	Mcr	Mb
Model 4	0.01506	2.45E+006	3.70E+004
Model 13	0.00267	5.76E+006	1.54E+004
Model 22	0.00045	14.92E+006	0.67E+004

Grafik diatas menerangkan bahwa pipa segi empat dianalisa dalam kondisi elasto-plastis dengan menambahkan nilai *yield stress*

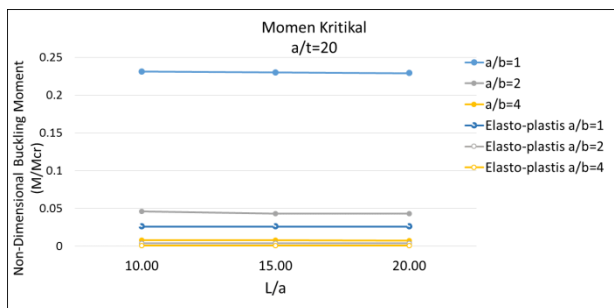
sebesar 250 Mpa. Dari grafik tampak bahwa M/M_{cr} (loadcasetime) sama bentuknya namun berbeda di nilai non-dimensional moment. Hal ini disebabkan karena dibatasi oleh besarnya yield stress.



Gambar 10. Momen Kritisal $a/t = 10$



Gambar 11. Momen Kritisal $a/t = 15$



Gambar 12 Momen Kritisal $a/t = 20$

Gambar 10, 11, 12 menunjukkan hubungan antara non-dimensional momen buckling yang terjadi dengan nilai l/a untuk masing-masing pipa segi empat. Untuk pipa sifat elastis, pipa yang lebih pendek memiliki momen buckling yang lebih besar daripada pipa yang lebih panjang. Hal ini disebabkan oleh besarnya nilai deformasi yang didapatkan akan mengurangi nilai momen buckling.

Semakin besar nilai deformasi maka semakin besar pula nilai momen buckling yang didapatkan.

Gambar menunjukkan pipa dengan sifat elasto-plastis, nilai momen buckling hampir konstan untuk masing-masing pipa sesuai dengan momen yang sama. Hal ini disebabkan oleh nilai maksimum momen bending yang digunakan dibatasi oleh yield stress.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, serangkaian perhitungan dari tekuk dengan menggunakan software non linier dan menggunakan perhitungan numerik dapat di tarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Daerah yang terjadi buckling berada di tengah model, terlihat di *midspan*
2. Dengan bertambahnya panjang pipa segi empat, momen buckling yang terjadi semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh semakin kecilnya deformasi yang terjadi menjadikan semakin kecil pula momen buckling yang terjadi saat elastis, namun saat elasto plastis nilai deformasi dan momen buckling relatif sama.
3. Semakin besar a/b atau semakin pipih model dengan panjang sama dan tebal sama maka semakin kecil nilai deformasinya dan momen buckling saat elastis begitupula saat elasto plastis
4. Pipa segi empat semakin tipis atau a/t semakin besar maka nilai deformasinya semakin kecil serta semakin kecil pula momen buckling-nya dengan L/a dan a/b sama.
5. Analisa elasto-plastis di semua model nilai momen buckling yang terjadi lebih kecil dari pipa segi empat yang bersifat elastis. Hal ini disebabkan oleh momen yang terjadi pada pipa segi empat dibatasi oleh yield stress sebesar 250 Mpa.

bending”. *Journal of Marine and Science Technology*. 95.

- [6] Soraya, Tanellia. 2015 “Analisa Buckling Tiang Mast Crane Akibat Beban Lentur Menggunakan Software Berbasis Metode Elemen Hingga”. *Jurnal. Teknik Perkapalan*. Universitas Diponegoro
- [7] Depari, Yelena Hartanti “Eksperimen Tekuk P Kritis Pada Circular Holloe Sections”. *Jurnal. Teknik sipil*. Universitas sumatra utara
- [8] Wiryanto Dewobroto.(2013).”Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000,Lumina Press .Jakarta. (release April 2013)
- [9] Popov, E.P., 1978. *Mechanics of Material, 2nd Edition*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

5.2. Saran

1. Perlu pendalaman untuk analisa *buckling* dengan menambahkan berbagai jenis sifat material.
2. Pipa segi empat yang sudah diteliti dapat menjadi acuan dalam merancang konstruksi dengan pertimbangan kekuatan pipa segi empat tersebut.
3. Model hasil penelitian bisa menjadikan acuan dengan skala yang diperbesar
4. Perlu analisa *buckling* dengan variasi pembebanan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] { Joseph E.Bowles,1985 }
- [2] Ross, C.T.F. 1985. *Finite Element Methods in Structural Mechanic*. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- [3] Muameleci, Mert. 2014. *Linear and Nonlinear Buckling Analyses of Plates using the Finite Element Method*. Thesis. Linköping: Department Management and Engineering, Linköping University.
- [4] Hibbler, Russell. 2004. *Mechanic of Material*. London: New Macmillian.
- [5] Yudo, Hartono., Takao Yoshikawa. 2014. “Buckling phenomenon for straight and curved pipe under pure