

STUDI KARAKTERISTIK *BUCKLING* PADA KOLOM *CRANE* KAPAL *FLOATING LOADING FACILITY (FLF)* BERBASIS *FINITE ELEMENT METHOD (FEM)*

Ihsan Aldi Prasetyo¹, Ahmad Fauzan Zakki¹, Hartono Yudo¹

¹Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: ihsanaldiprasetyo@gmail.com

Abstrak

Floating Loading Facility (FLF) digunakan untuk pemindahan muatan curah seperti batu bara dari kapal tongkang ke kapal bulk carrier. Peralatan utama dan paling penting pada *Floating Loading Facility (FLF)* adalah crane. Spesifikasi crane yang dibutuhkan harus sesuai dengan beban yang akan diangkut, dalam hal ini bagian kolom crane adalah bagian yang perlu diperhatikan karena bisa terjadi kegagalan struktur dibagian tersebut. Kolom merupakan suatu elemen struktur tekan yang memegang peranan penting dari suatu bangunan, sehingga keruntuhan pada suatu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya lantai yang bersangkutan dan juga runtuh total seluruh struktur. Dan salah satu kegagalan struktur yang sering terjadi pada kolom adalah *buckling* atau tekuk. Pada penelitian ini kolom crane di variasikan menggunakan profil dan tidak menggunakan profil serta perbandingan penguat dengan menggunakan momen bending pada kondisi yang berbeda-beda. *Buckling* dianalisa menggunakan metode elemen hingga dengan mempertimbangkan sifat material pada kolom, yaitu elastis dan elasto-plastis, serta deformasi yang terjadi. Kolom dengan profil menghasilkan momen *buckling* tertinggi $5,33 \times 10^8$ tetapi untuk nilai deformasinya masih lebih besar dibanding kolom yang menggunakan profil dan penguat. Nilai kekuatan pada analisa elastis lebih besar dari nilai kekuatan pada analisa elasto-plastis.

Kata kunci: *Floating Loading Facility*, Kolom Crane, *Buckling*, Deformasi, Elasto-Plastis, Profil.

1. PENDAHULUAN

Floating Loading Facility (FLF) digunakan untuk pemindahan muatan curah seperti batu bara dari kapal tongkang ke kapal bulk carrier. Beberapa jenis *Floating Loading Facility (FLF)* yang ada di Indonesia adalah FLF Ratu Dewata, FLF Ratu Kumala, FLF Ratu Barito, FLF Ratu Mahakam, dan lain-lain. Peralatan utama dan paling penting pada *Floating Loading Facility (FLF)* adalah crane.

Crane telah banyak digunakan untuk mengangkat maupun memindahkan mesin, alat, container dan benda berat lainnya. Ada banyak macam jenis crane sesuai dengan kebutuhan industri seperti *tower crane*, *overload crane*, *mobile crane* dan *gantry crane*. Spesifikasi crane yang dibutuhkan harus sesuai dengan beban yang akan diangkut agar owner kapal melakukan pemindahan muatan dengan maksimal dan mempersingkat waktu. [1]

Untuk mencapai hal tersebut struktur crane harus sesuai dengan beban muatan yang akan dipindahkan, dalam hal ini bagian kolom crane adalah bagian yang perlu diperhatikan karena bisa terjadi kegagalan struktur dibagian tersebut. Ada dua kategori utama yang mengarah ke kegagalan tiba-tiba pada komponen mekanik: kegagalan material dan ketidakstabilan struktural, yang sering disebut tekukan (*buckling*). Jika pada suatu kolom dikenai beban maka kolom tersebut akan mengalami tekukan (*buckling*). Tekukan ini dapat terjadi meskipun besarnya tegangan maksimum pada batang lebih kecil dari yield point bahan.

Buckling pada struktur sangat sensitif terhadap ketidaksempurnaan; ketidaksempurnaan ini bisa didapat dari berbagai jenis, misalnya, variasi ketebalan, perforasi, bagian penguat, atau tegangan sisa. Kondisi pembebanan juga merupakan parameter penting yang mempengaruhi perilaku *buckling* dari suatu struktur. [2]

Ditinjau dari permasalahan diatas penulis mencoba memberikan gambaran karakteristik *buckling* pada kolom *crane* dengan menggunakan variasi penggunaan profil dan penguat pada struktur kolom. Kolom akan dimodelkan menggunakan MSC Patran dan untuk analisa akan dibantu oleh MSC Marc (Mentat).

2. TINJAUAN PUSTAKA

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.

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 silinder akibat beban tekuk kritis dapat didapatkan dengan rumus: [2]

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{\pi r^2 t}$$

$$M_{cr} = 0.605\pi E r t^2$$

Nilai maksimum menurut Yudo dan Yoshikawa [2] pada pipa lurus akibat beban tekuk kritis adalah:

$$M_{max} = M_k = 0.378\pi E r t^2$$

$$\sigma_{max} = 0.51 E t / r$$

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 eigen. 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. 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*.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dipakai *crane* dari LIEBHERR *type* CBB. *Crane* ini yang biasa digunakan pada *Floating Loading Facility* (FLF). Berikut data spesifikasi *crane* sebagai berikut :

H	: 16.12 m
Capacity (grab operate)	: 32.00 ton, from 4.05m to 32.0m radius
Minimum radius	: 4.05m (approx. 83° boom angle)
Maximum radius	: 32.0m (approx. 15° boom angle)
Ø besar	: 2.63 m
Ø kecil	: 2.09 m
Profil T	: T 400 x 16 + 150 x 20
Tebal Ring Penguat	: 16 mm
Jarak Tiap Ring	: 3 m

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Pembebanan

Beban diberikan di tiap titik tengah ujung tiang bagian atas pada setiap variasi model.

1. Pembebanan Operasional

$W = 32 \text{ ton} = 32000 \text{ kg}$
 $F = 32000 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 313600 \text{ N}$
 $L_1 = 4.05 \text{ m (boom angle } 83^\circ)$
 $L_2 = 25.2 \text{ m (boom angle } 39^\circ)$
 $L_3 = 32 \text{ m (boom angle } 15^\circ)$

$Mop = F \times L$ [1]

$Mop_1 = F \times L_1$
 $= 313600 \text{ N} \times 4.05 \text{ m}$
 $= 1.27 \times 10^6 \text{ Nm}$

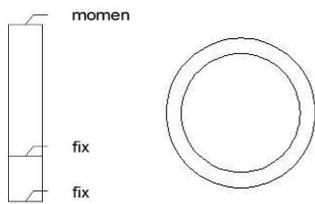
$Mop_2 = F \times L_2$
 $= 313600 \text{ N} \times 25.2 \text{ m}$
 $= 7.90 \times 10^6 \text{ Nm}$

$Mop_3 = F \times L_3$
 $= 313600 \text{ N} \times 32 \text{ m}$
 $= 1.00 \times 10^7 \text{ Nm}$

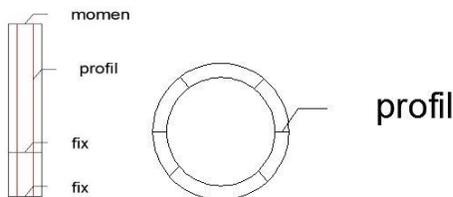
2. Pembebanan Kritis

$Mcr = 0.605\pi Ert^2$ [2]
 $= 0.605 \times 3.14 \times 2 \times 10^{11} \times 1.315 \times (0.025)^2$
 $= 3,12 \times 10^8 \text{ Nm}$

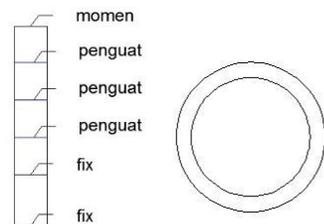
4.2 Penentuan Kondisi Batas



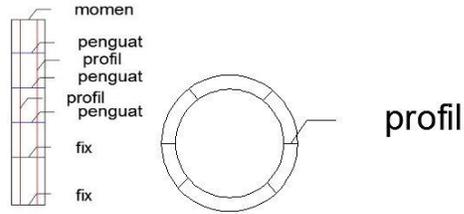
Gambar 1. Model 1



Gambar 2. Model 2



Gambar 3. Model 3



Gambar 4. Model 4

4.3 Validasi Model

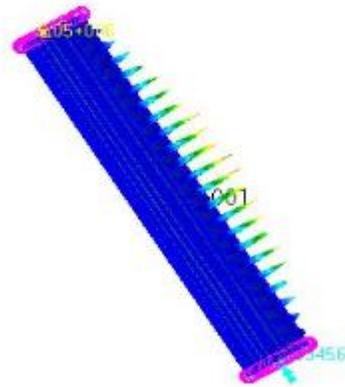
Untuk dapat dikatakan mendekati benar, maka persentase validitasnya harus dibawah 5% agar nilai tersebut dapat dikatakan valid.

Tabel 1. Validasi Model

Validasi		
Perhitungan	1.1 m	95.45 %
Software	1.05 m	

4.4 Hasil Analisa

4.4.1 Menggunakan MSC Nastran Patran



Gambar 5. Gambar analisa dengan Nastran Patran

A. Model 1 (Tanpa Profil dan Tanpa Penguat)

Untuk analisa elastis yang diberikan beban Mcr mendapatkan eigenvalue 1,0061. Sedangkan eigenvalue yang didapat dari pemberian Mop adalah 400.36, 64.362, dan 50.846. Untuk analisa elastis yang diberikan Mb mendapatkan 0,95793.

B. Model 2 (Dengan Profil dan Tanpa Penguat)

Untuk analisa elastis yang diberikan beban Mcr mendapatkan eigenvalue 1,0021. Sedangkan eigenvalue yang didapat dari

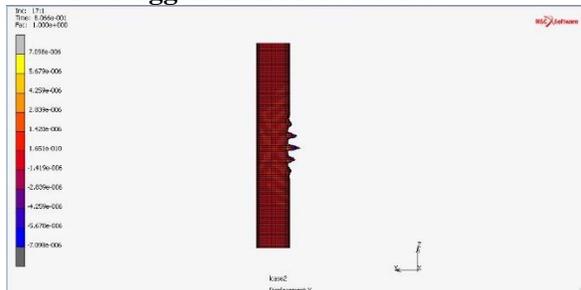
pemberian Mop adalah 407.68, 65.538, dan 51.775. Untuk analisa elastis yang diberikan Mb mendapatkan 0,80407.

- C. Model 3 (Tanpa Profil dan Dengan Penguat)

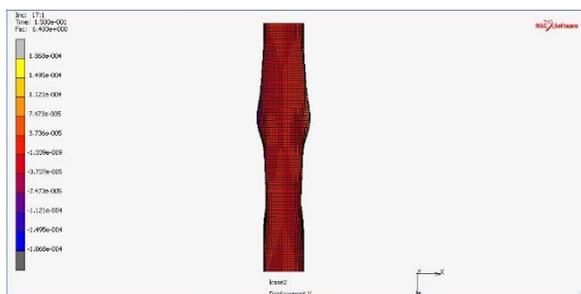
Untuk analisa elastis yang diberikan beban Mcr mendapatkan eigenvalue 1,0051. Sedangkan eigenvalue yang didapat dari pemberian Mop adalah 402.91, 64.772, dan 51.17. Untuk analisa elastis yang diberikan Mb mendapatkan 0,57542.
- D. Model 4 (Dengan Profil dan Dengan Penguat)

Untuk analisa elastis yang diberikan beban Mcr mendapatkan eigenvalue 1,0034. Sedangkan eigenvalue yang didapat dari pemberian Mop adalah 448.35, 72.077, dan 56.941. Untuk analisa elastis yang diberikan Mb mendapatkan 0,78.

4.4.2 Menggunakan Marc Mentat



Gambar 6. Gambar analisa elastis dengan Marc Mentat



Gambar 7. Gambar analisis elasto-plastis dengan Marc Mentat

- A. Model 1 (Tanpa Profil dan Tanpa Penguat)

Untuk analisa elastis didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 41,73 mm dengan momen *buckling* sebesar $3,89 \times 10^8$ Nm. Untuk analisa elasto-plastis

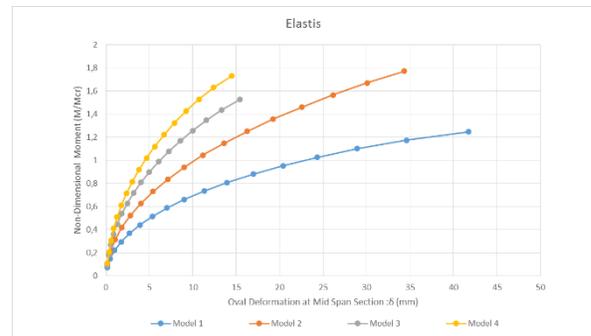
didapatkan nilai deformasi sebesar 9,3 mm dengan momen *buckling* sebesar $6,13 \times 10^7$ Nm.

- B. Model 2 (Dengan Profil dan Tanpa Penguat)

Untuk analisa elastis didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 14,47 mm dengan momen *buckling* sebesar $5,4 \times 10^8$ Nm. Untuk analisa elasto-plastis didapatkan nilai deformasi sebesar 2,78 mm dengan momen *buckling* sebesar $6,63 \times 10^7$ Nm.
- C. Model 3 (Tanpa Profil dan Dengan Penguat)

Untuk analisa elastis didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 15,4 mm dengan momen *buckling* sebesar $3,07 \times 10^8$ Nm. Untuk analisa elasto-plastis didapatkan nilai deformasi sebesar 3,07 mm dengan momen *buckling* sebesar $6,24 \times 10^7$ Nm.
- D. Model 4 (Dengan Profil dan Dengan Penguat)

Untuk analisa elastis didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 34,35 mm dengan momen *buckling* sebesar $5,53 \times 10^8$ Nm. Untuk analisa elasto-plastis didapatkan nilai deformasi sebesar 5,68 mm dengan momen *buckling* sebesar $6,86 \times 10^7$ Nm.

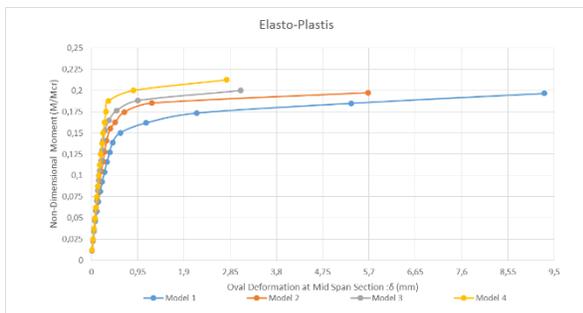


Gambar 8. Deformasi pada Tengah Tiang (Elastis)

Pada gambar 8 menunjukkan model 4 yang menggunakan profil dan penguat mengalami nilai deformasi yang kecil. Bahkan bisa dilihat untuk model 4 dibandingkan model yang lain mempunyai nilai deformasi tidak lebih dari 40 mm. Sedangkan pada model 2 yang hanya menggunakan penguat saja tanpa adanya profil

mempunyai nilai deformasi dibawah model 4 dengan deformasi sebesar 34,35 mm.

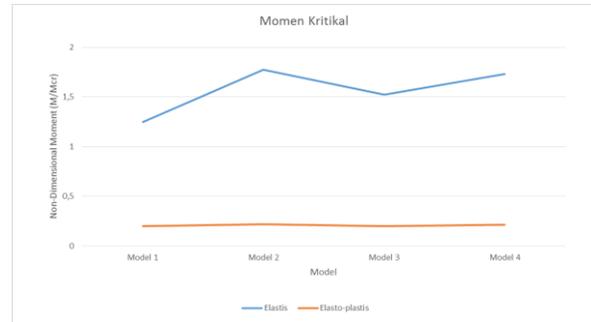
Dan pada kolom yang menggunakan profil tetapi tidak adanya penguat mengalami deformasi sebesar 15,4 mm. Untuk model 1 memiliki nilai deformasi yang paling besar diantara yang lain dengan kondisi tidak menggunakan profil dan juga tidak menggunakan penguat memiliki deformasi sebesar 41,73 mm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel yang terpenting untuk memperkecil momen yang ada dengan adanya penguat pada kolom yang akan dipasang pada kapal Floating Loading Facility (FLF), sedangkan profil pun sangat berpengaruh walaupun tidak begitu berpengaruh besar tetapi juga menjadi variabel yang dapat mengurangi deformasi itu sendiri. Untuk hasil yang paling baik dari grafik diatas dengan melengkapi kolom dengan penguat dan juga menggunakan profil.



Gambar 9. Deformasi pada Tengah Tiang (Elasto-Plastis)

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara momen *buckling* yang terjadi dengan nilai tiap model untuk masing-masing kolom. Untuk kolom sifat elastis, kolom yang lebih rendah memiliki momen *buckling* yang lebih besar daripada kolom 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.

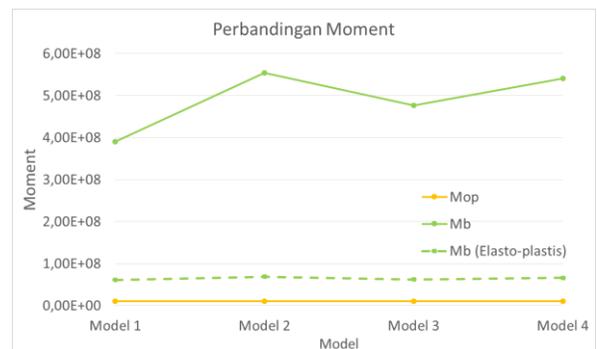
Untuk kolom sifat elasto-plastis, nilai momen *buckling* hampir konstan untuk masing-masing kolom. Hal ini disebabkan oleh nilai maksimum momen bending yang digunakan dibatasi oleh yield stress.



Gambar 10. *Buckling* Moment berdasarkan tiap model

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara momen *buckling* yang terjadi dengan nilai tiap model untuk masing-masing kolom. Untuk kolom sifat elastis, kolom yang lebih rendah memiliki momen *buckling* yang lebih besar daripada kolom 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.

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



Gambar 11. Perbandingan Momen yang Terjadi pada Kolom

Tabel 2. *Safety Factor* Mop_1

Kolom	Mop	Mb	SF
Model 1	1,27E+06	3,90E+08	306,85
Model 2	1,27E+06	5,41E+08	425,86
Model 3	1,27E+06	4,77E+08	375,21
Model 4	1,27E+06	5,54E+08	436,18

Tabel 3. *Safety Factor Mop₂*

Kolom	Mop	Mb	SF
Model 1	7,90E+06	3,90E+08	49,33
Model 2	7,90E+06	5,41E+08	68,46
Model 3	7,90E+06	4,77E+08	60,32
Model 4	7,90E+06	5,54E+08	70,12

Tabel 4. *Safety Factor Mop₃*

Kolom	Mop	Mb	SF
Model 1	1,00E+07	3,90E+08	38,97
Model 2	1,00E+07	5,41E+08	54,08
Model 3	1,00E+07	4,77E+08	47,65
Model 4	1,00E+07	5,54E+08	55,40

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap variasi kolom dengan profil dan penguat maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Buckling momen terkecil terjadi pada model 1 (Tanpa Penguat dan Tanpa Profil) dikarenakan besarnya deformasi yang besar terjadi pada model 1. Nilai momen buckling untuk masing-masing model adalah (10^8 Nm) 3,90 ; 5,41 ; 4,77 ; 5,54.
2. Variabel yang mempengaruhi dalam hal deformasi dengan penggunaan profil dan penguat yang paling utama karena dengan variabel tersebut membuat nilai deformasi semakin kecil terbukti dalam grafik perubahan deformasi pada tengah kolom dari model 4 (Dengan Profil dan Dengan Penguat) sebesar 35,10 mm. Untuk analisa elasto-plastis, nilai momen *buckling* yang terjadi lebih kecil dari tiang yang bersifat elastis. Hal ini disebabkan oleh momen yang terjadi pada tiang dibatasi oleh *yield stress*.
3. Seluruh model dikatakan aman beroperasi karena momen operasional berada dibawah momen *buckling*, hanya untuk model yang paling baik adalah model 4 dinilai dari deformasi yang terjadi terhadap momen perubahannya lebih kecil dibanding model yang lain.

SARAN

1. Perlu pendalaman untuk analisa *buckling* dengan menambahkan berbagai jenis sifat material.
2. Variasi model yang digunakan untuk analisa *buckling* tidak hanya terbatas pada variasi penambahan profil dan penguat saja.

3. Kolom yang sudah diteliti dapat dihubungkan dengan regulasi penempatan *crane* pada kapal. ini dibuat untuk memudahkan proses pencetakan jurnal. Kerjasama dan kesediaan penulis mengikuti acuan pennisan sangat diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sudarmoko. 1996. Perencanaan dan Analisis Kolom Beton Bertulang. Biro Penerbit. Yogyakarta
- [2] Yudo, Hartono., Takao Yoshikawa. 2014. “*Buckling* phenomenon for straight and curved pipe under pure bending”. Journal of Marine and Science Technology. 95.
- [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] Popov, E.P., 1978. Mechanics of Material, 2nd Edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.