

**TUGAS AKHIR**  
**BIDANG PERANCANGAN DAN KONSTRUKSI MESIN**

**PENGHITUNGAN KEKUATAN *BUCKLING* STRUKTUR SILINDER  
BERDINDING TIPIS AKIBAT BEBAN TEKAN AKSIAL DENGAN  
MELIBATKAN PENGARUH KETIDAKSEMPURNAAN GEOMETRI**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menyelesaikan  
Pendidikan Tahap Sarjana

Oleh :

**HAFIZ ZACHARI**  
**NBP. 07 171 061**



**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS ANDALAS**  
**PADANG, 2012**



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
FAKULTAS TEKNIK, UNIVERSITAS ANDALAS  
JURUSAN TEKNIK MESIN

Kampus Limau Manis, Padang 25163, Telp. 0751-72586, Fax. 0751-72566

---

---

**TUGAS AKHIR**

**BIDANG PERANCANGAN DAN KONSTRUKSI MESIN**

Tugas Akhir sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas diberikan kepada:

Nama : Hafiz Zachari  
Nomor Buku Pokok : 07 171 061  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur  
Dr. Eng. Eka Satria  
Waktu Penyelesaian : 10 Bulan  
Judul : Penghitungan Kekuatan *Buckling* Struktur Silinder  
Berdinding Tipis Akibat Beban Tekan Aksial Dengan  
Melibatkan Pengaruh Ketidakteraturan Geometri

Uraian Tugas :

1. Studi literatur.
2. Penyiapan model-model numerik yang mencakup geometri silinder, bentuk dan dimensi cacat geometri, sifat material dan jenis kondisi tumpuan (kondisi batas).
3. Penghitungan kekuatan *buckling* struktur dengan melibatkan ketidaksempurnaan geometri analisa elastoplastik menggunakan paket program komersil.
4. Penghitungan kekuatan *buckling* elastoplastik silinder dengan standar perancangan Eurocode ENV 1996-1-3 untuk kelas A, B dan C, ECCS 1988, dan DIN 18800/4.
5. Perbandingan kekuatan *buckling* struktur dengan harga kekuatan *buckling* yang diberikan oleh standar perancangan.

Padang, Juli 2011

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur  
NIP. 19580821 198603 1 002

Dr. Eng. Eka Satria  
NIP. 132 297 308

# LEMBAR PENGESAHAN

## PENGHITUNGAN KEKUATAN *BUCKLING* STRUKTUR SILINDER BERDINDING TIPIS AKIBAT BEBAN TEKAN AKSIAL DENGAN MELIBATKAN PENGARUH KETIDAKSEMPURNAAN GEOMETRI

Oleh :

**HAFIZ ZACHARI**

**NBP. 07 171 061**

Padang, Mei 2012

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur  
NIP. 19580821 198603 1 002

Dr. Eng. Eka Satria  
NIP. 132 297 308



***“Bacalah dengan (menyebut) nama Tuhan-mu yang menciptakan. Dia telah menciptakan manusia dari segumpal darah. Bacalah, dan Tuhan-mulah Yang Maha Pemurah. Yang mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahuinya” (QS. Al ‘Alaq 96:1-5)***

*Kupersembahkan tulisan ini sebagai bakti tulus kepada Ayahku Amrizal Moechtar, M.T. dan Bundaku Ir. Inca Priyanti yang selalu mencurahkan kasih dan sayangnnya kepadaku, serta adik-adikku Mohamad Riyan Kamil dan Rizca Zahra atas segala semangat yang telah diberikan untuk menggapai cita-citaku.*

*Ucapan terimakasih yang tulus kepada seluruh Dosenku, Guru-guruku, atas ilmu dan didikan yang diberikan kepadaku, Semoga menjadi amal shaleh disisi Allah SWT, Amin...*

*Untuk teman-teman ku sesama asisten Laboratorium Dinamika Struktur, teman seangkatan M'07, kakak serta adik angkatan, sahabat-sahabatku terimakasih atas bantuan dan dukungannya.*

*Akhirnya... semoga semua ilmu pengetahuan yang telah ku peroleh menjadi ilmu yang bermanfaat bagi Diriku Agamaku, Keluargaku, Bangsaku, dan Negaraku.*

## **SARI**

*Tugas akhir ini bertujuan untuk menghitung kekuatan buckling silinder berdinding tipis akibat beban tekan aksial. Berdasarkan dari hasil penelitian sebelumnya, ada dua faktor yang mempengaruhi harga kekuatan buckling. Pertama, keberadaan cacat geometri (ketidaktepatan geometri) yang biasanya terdapat pada dinding silinder, dan kedua, ketidaktepatan material silinder. Pengaruh kedua faktor ini dapat mengakibatkan kekuatan buckling silinder tereduksi secara signifikan, bahkan sampai 70% dari harga kekuatan buckling linear. Pengaruh faktor ketidaktepatan material, biasanya diasumsikan konstan untuk material sejenis. Oleh karena itu, keberadaan cacat geometri menjadi faktor yang paling berperan dalam perancangan silinder berdinding tipis akibat beban tekan aksial ini. Karena bentuknya yang sangat beragam, maka diperlukan kajian yang sistematis mengenai model cacat geometri seperti apa yang mampu mereduksi kekuatan buckling menuju harga yang dipertimbangkan paling rendah. Selain itu, model cacat geometri yang dicari juga harus mendekati bentuk sebenarnya yang ada di lapangan serta bentuk tersebut harus paling sensitif terhadap jenis pembebanan tekan aksial.*

*Struktur silinder yang dianalisa dipilih dari silinder yang memiliki dimensi dengan perbandingan radius terhadap ketebalan ( $R/t$ ) antara 250 sampai 1250, yang dianggap mewakili struktur-struktur storage di lapangan, seperti struktur tangki dan silo. Sedangkan cacat geometri yang digunakan dipilih dari model yang dikembangkan oleh Schneider dengan besar simpangan cacat terhadap ketebalan silinder ( $\omega/t$ ) bervariasi antara 0,2 sampai 10. Penghitungan kekuatan buckling dilakukan dengan menggunakan analisa numerik berdasarkan metode elemen hingga dengan memperhitungkan pengaruh ketidaktepatan geometri dan material*

*Hasil akhir yang diperoleh memperlihatkan keberadaan cacat geometri pada silinder berdinding tipis dapat mereduksi harga kekuatan buckling struktur tersebut secara signifikan. Sebagai contoh untuk struktur yang dianalisa,  $R/t= 250$  sampai 1500, dapat mereduksi kekuatan buckling rata-rata sekitar 20% sampai 80% dari kekuatan luluhnya. Harga dari faktor reduksi ini kemudian diverifikasi dengan menggunakan standar-standar perancangan yang telah banyak digunakan dalam perancangan silinder berdinding tipis, seperti ECCS 1988, DIN 18800/4 dan Eurocode ENV 1993-1-6. Hasil verifikasi memperlihatkan bahwa secara umum harga faktor reduksi yang diperoleh melalui analisa*

*numerik dapat didekati oleh standar-standar perancangan yang ada. Oleh karena itu, harga faktor reduksi ini dapat dipertimbangkan untuk digunakan oleh praktisi di lapangan dalam menentukan prediksi awal kekuatan buckling dari suatu silinder ber dinding tipis akibat beban tekan aksial.*

**Keywords:** *Struktur Silinder, Cacat Geometri, Faktor Reduksi, Kekuatan Buckling*

## **ABSTRACT**

*This final project mainly focuses on buckling strength calculation of thin walled cylindrical structures under axial compression. Based on previous researches, there are two factors that significantly affect buckling strength of cylindrical structure. The first is geometrical imperfection which is commonly appear on cylindrical wall and the second is material imperfection of cylindrical structure. The influence of these factors will reduce buckling strength significantly, even until 70% of linear buckling strength. Because of the influence of material imperfection is assumed to be constant for the same material, therefore, the existence of geometrical imperfection becomes the most important factor in designing of thin walled cylindrical under axial compression.*

*This final project adopts a ring shape imperfection which is previously developed by Schneider as the main shape of imperfection. Then, this imperfection is attached on the wall of cylindrical structures that have a radius to thickness ratio ( $R/t$ ) between 250 to 1250. The range of dimension is assumed to represent storage structures in the field, such as tank and silo structure. The imperfection dimension is given under variation of amplitude of imperfection to the thickness of cylinder, ( $\omega/t$ ), between 0,2 to 10. Calculation of buckling strength is performed by a nonlinear numerical analysis based on finite element technique.*

*The final result shows that the presence of the geometrical imperfection in the thin walled cylindrical structures can significantly reduce the buckling strength of the structure. As an example, for the structures with  $R/t=250$  to 1500, the buckling strength can be reduced about 20% to 80% of yield strength. The value of the reduction factor is verified by several design standards that have been widely used in designing thin-walled cylinder, such as the ECCS 1988, DIN 18800/4 and Eurocode ENV 1993-1-6. Verification shows that the reduction factor which is obtained through numerical analysis can be very well approached by the design standards. Therefore, these numerical reduction factors can be considered to be used in determining the initial prediction of the buckling strength of thin walled cylindrical structures under axial compressive load for many practical applications in the field.*

**Keywords:** *Cylindrical Shells, Geometry Imperfection, Reduction Factors, Buckling Strength*

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis sampaikan kehadiran Allah SWT, karena dengan berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap sarjana di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas dan dibuat ketika penulis menjadi asisten pada Laboratorium Dinamika Struktur.

Pada kesempatan kali ini penulis ucapkan terima kasih kepada Bapak Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur dan Bapak Dr. Eng. Eka Satria yang telah membimbing, memberi pengajaran, nasehat dan diskusi-diskusi dalam penyelesaian tugas akhir ini. Disamping itu Bapak Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur juga berperan sebagai ketua sidang sarjana yang telah berlangsung pada hari kamis tanggal 3 Mei 2012 pukul 13.00 WIB di ruang sidang Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas.

Kepada Bapak Dr. H. Is Prima Nanda, Bapak Zulkifli Amin, Ph.D, dan Bapak Iskandar R, M.T. sebagai anggota tim penguji, penulis sampaikan pula rasa terima kasih atas nasehat-nasehat yang telah diberikan setelah berlangsungnya sidang sarjana.

Semua yang penulis kerjakan ini tidak ada artinya tanpa dukungan keluarga penulis. Pengertian, dukungan moril maupun materil dan do'a mereka selama penulis menempuh pendidikan merupakan dorongan yang tidak ternilai. Semoga Allah senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada mereka semua.

Terakhir, ucapan terima kasih kepada seluruh asisten Laboratorium Dinamika Struktur yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir ini dan kepada rekan-rekan M'07 yang juga telah memberikan dorongan dan motivasi.

Akhir kata semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Padang, Mei 2012

Penulis



# DAFTAR ISI

## SARI

## ABSTRACT

<b>KATA PENGANTAR</b>	...	i
<b>DAFTAR ISI</b>	...	ii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	...	iv
<b>DAFTAR TABEL</b>	...	vi
<b>DAFTAR SIMBOL</b>	...	vii

## 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	...	1
1.2	Perumusan Masalah	...	6
1.3	Tujuan	...	8
1.4	Manfaat	...	8
1.5	Batasan Masalah	...	9
1.6	Sistematika Penulisan	...	9

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Metoda Pencarian Cacat Geometri	...	10
2.1.1	Kekuatan <i>Buckling</i> Terendah Berdasarkan Hasil Tes Eksperimen	...	10
2.1.2	Kekuatan <i>Buckling</i> Terendah Berdasarkan Bentuk Cacat Geometri dari Metode Komputasi	...	11
2.1.3	Kekuatan <i>Buckling</i> Terendah Berdasarkan Pendekatan Analitik	...	11
2.1.4	Kekuatan <i>Buckling</i> Terendah Berdasarkan Penggunaan Bentuk Cacat Geometri Yang Terdapat Pada Struktur Sebenarnya Di Lapangan.	...	12
2.2	Pencarian Bentuk Cacat Geometri Terburuk	...	13
2.3	Penelitian Oleh Schneider	...	13
2.4	Standar-Standar Perancangan	...	14

2.5	Analisa Elasto-plastik Struktur Silinder Dengan Ketidaksempurnaan Geometri Akibat Pengaruh Beban Tekan Aksial	...	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN</b>		
3.1	Penyiapan Model Numerik	...	18
3.2	Penentuan Kondisi Batas	...	19
3.3	Penentuan Jumlah dan Bentuk Meshing ( <i>Mesh Convergence</i> )	...	23
3.4	Tahapan Penghitungan Kekuatan <i>Buckling</i> Struktur Dengan Ketidaksempurnaan Geometri Menggunakan Analisa Elasto-plastik	...	23
<b>4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Pemilihan Bentuk Cacat Geometri	...	25
4.2	Pemodelan Numerik	...	25
4.3	Kondisi Batas	...	26
4.4	Analisis Komputasi	...	26
4.4.1	Hasil Penghitungan Pendahuluan (Tahap-1)	...	26
4.4.2	Hasil Penghitungan Utama Kekuatan <i>Buckling</i> Elasto-plastik Silinder (Tahap-2)	...	31
4.4.3	Penghitungan Kekuatan <i>Buckling</i> Elasto-plastik Silinder Dengan Standar Perancangan (Tahap-3)	...	33
4.4.4	Perbandingan Kekuatan <i>Buckling</i> Elasto-plastik Silinder Dengan Standar Perancangan (Tahap-4)	...	35
4.5	Rekomendasi Praktis Untuk Perancangan	...	37
<b>5</b>	<b>PENUTUP</b>		
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		
	<b>LAMPIRAN A</b>		
	Verifikasi Program Komputasi		

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	Contoh beberapa silinder berdinding tipis dikenai beban tekan aksial (a) <i>tower</i> , (b) <i>tank</i> dan (c) <i>silo</i>	...	2
<b>Gambar 1.2</b>	Kegagalan <i>buckling</i> silinder berdinding tipis akibat beban tekan aksial (a) kondisi di lapangan, (b) hasil eksperimen	...	2
<b>Gambar 1.3</b>	Kekuatan <i>buckling</i> hasil eksperimen	...	3
<b>Gambar 1.4</b>	Jenis-jenis analisa pendekatan untuk menghitung kekuatan <i>buckling</i> struktur silinder	...	5
<b>Gambar 2.1</b>	Bentuk fabrikasi untuk silinder <i>tank</i> atau silo	...	12
<b>Gambar 2.2</b>	Model cacat geometri cincin melingkar oleh Schneider	...	14
<b>Gambar 3.1</b>	Dua jenis kondisi batas, tipe A dan tipe B	...	19
<b>Gambar 3.2</b>	Jenis perpindahan pada silinder	...	20
<b>Gambar 3.3</b>	Pemodelan kondisi batas tipe A	...	21
<b>Gambar 3.4</b>	Pemodelan kondisi batas tipe B	...	22
<b>Gambar 4.1</b>	Penggunaan model $\frac{1}{4}$ silinder dengan memanfaatkan prinsip kesimetrian	...	25
<b>Gambar 4.2</b>	(a). Tipe <i>concave</i> (kiri) dan (b). Tipe <i>convex</i> (kanan)	...	27
<b>Gambar 4.3</b>	Kekuatan <i>buckling</i> dengan kelengkungan <i>concave</i> dan <i>convex</i> pada kondisi batas tipe A	...	28
<b>Gambar 4.4</b>	(a) Model-1 dengan cacat geometri di tengah dari tinggi silinder dan (b) Model-2 dengan cacat geometri pada bagian dasar dari tinggi silinder	...	29
<b>Gambar 4.5</b>	Kekuatan <i>buckling</i> berdasarkan letak cacat geometri	...	29
<b>Gambar 4.6</b>	Kekuatan <i>buckling</i> untuk dua jenis silinder dengan perbedaan L/R	...	30
<b>Gambar 4.7</b>	Kegagalan <i>buckling</i> karena perpindahan yang besar pada simpangan terbesar cacat geometri yang diberikan	...	31

<b>Gambar 4.8</b>	Kekuatan <i>buckling</i> elasto-plastik silinder terhadap perpindahan radial	...	32
<b>Gambar 4.9</b>	Kekuatan <i>buckling</i> silinder berdinding tipis akibat beban tekan aksial dalam berbagai variasi standar perancangan	...	34
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan hasil kekuatan <i>buckling</i> elasto-plastik secara numerik dengan standar-standar perancangan	...	36

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Pemilihan parameter geometri silinder	...	18
<b>Tabel 3.2</b>	Pemilihan dimensi cacat geometri	...	18
<b>Tabel 3.3</b>	Pemilihan material	...	19
<b>Tabel 3.4</b>	Kondisi batas struktur silinder	...	20
<b>Table 4.1</b>	Perbedaan kekuatan <i>buckling</i> dalam variasi kelengkungan dan kondisi batas	...	28
<b>Table 4.2</b>	Pengaruh lokasi cacat geometri terhadap kekuatan <i>buckling</i> silinder	...	30
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil penghitungan kekuatan <i>buckling</i> silinder akibat beban tekan aksial dengan standar-standar perancangan	...	34
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil komputasi kekuatan <i>buckling</i> elasto-plastik silinder akibat beban tekan aksial	...	37

## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Arti	Satuan
R	Jari- jari silinder	mm
t	Ketebalan silinder	mm
$\sigma_{cr}^{lin}$	Tegangan kritis klasik	N/mm <sup>2</sup>
E	Modulus elastisitas	GPa
$\nu$	<i>Poisson's ratio</i>	
$P_{cr,cl}$	Pembebanan kritis <i>classic</i>	N
$P_{cr,el}$	Pembebanan kritis elastis	N
$P_{cr,ep-pl}$	Pembebanan kritis elasto-plastik	N
$P_{cr,cl,imp}$	Pembebanan kritis <i>classic imperfection</i>	N
$P_{cr,el,imp}$	Pembebanan kritis elastis <i>imperfection</i>	N
$P_{cr,ep-pl,imp}$	Pembebanan kritis elasto-plastik <i>imperfection</i>	N
$\alpha$	Faktor reduksi akibat keberadaan cacat geometri	
$\beta$	Faktor reduksi akibat keberadaan cacat material	
$\gamma$	Faktor reduksi total	
$\sigma_{cr,imperfect}^{elastic}$	Tegangan kritis elastis <i>imperfection</i>	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{cr,imperfect}^{elasto-plastic}$	Tegangan kritis elasto-plastik <i>imperfection</i>	N/mm <sup>2</sup>
lc	Panjang cacat material	mm
$\omega$	Simpangan cacat	mm
$\omega_0$	Simpangan cacat maksimum	mm
x	Lokasi cacat geometri dari tumpuan bawah	mm

$x_o$	Panjang lokasi cacat geometri dari tumpuan bawah	mm
$\lambda$	<i>slenderness ratio</i>	
Q	Kualitas fabrikasi permukaan silinder	
$\sigma_y$	Tegangan luluh	N/mm <sup>2</sup>
$l_o$	Lokasi cacat geometri	mm
G	Modulus geser	N/mm <sup>2</sup>
P	Pembebanan	N
$R_o$	Jari- jari silinder luar	mm
$R_i$	Jari- jari silinder dalam	mm
u	Perpindahan vertikal	
w	Perpindahan radial	
v	perpindahan <i>circumferential</i>	
$\theta$	rotasi <i>circumferential</i>	
$\varphi$	rotasi meridional	
$x_L, y_L, z_L$	Koordinat lokal kekakuan pegas arah (x,y,z) pusat silinder	
$K_{XL}=K_{YL}=K_{ZL}$	kekakuan pegas arah (x,y,z) pusat silinder	
L	Tinggi silinder atau tinggi batang	mm
$\delta_w$	Perpindahan radial	mm
A	Luas penampang	mm <sup>2</sup>
b	Panjang penampang material	mm
h	Lebar penampang material	mm
r	Radius <i>gyration</i>	mm
I	Inersia penampang	mm <sup>4</sup>