

## PENGUJIAN NORSOK STANDARD N-004 (*DESIGN OF STEEL STRUCTURES*) UNTUK BATANG TUBULAR PENYOK TIDAK *DI-GROUT* DAN *DI-GROUT* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Ranny Adriana<sup>1</sup>, Made Suarjana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Pertamina

<sup>2</sup>Institut Teknologi Bandung

<sup>1</sup>Email: [ranny.adriana@universitaspertamina.ac.id](mailto:ranny.adriana@universitaspertamina.ac.id)

<sup>2</sup>Email: [msuarjana@itb.ac.id](mailto:msuarjana@itb.ac.id)

**Abstrak:** Struktur anjungan lepas pantai biasanya menggunakan struktur baja tubular sebagai komponen utama penyusunnya. Kerusakan penyok dapat terjadi pada baja tubular akibat tabrakan kapal. Salah satu cara untuk memperbaikinya adalah dengan menerapkan sistem *fully grouted*. Perumusan mengenai kapasitas beban aksial tekan batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) terdapat dalam NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*). Hasil perhitungan berdasarkan NORSOK STANDARD N-004 ini diperiksa dan dianalisis serta dibandingkan dengan hasil dari pemodelan elemen hingga. Dalam penelitian ini, diperoleh bahwa kenaikan kapasitas beban tekuk Euler (beban kritis) rata-rata pada perhitungan NORSOK STANDARD N-004 yaitu 35.86% (min. 20.50% dan maks. 47.44%), dan pada perhitungan pemodelan elemen hingga yaitu 46.30% (min. 44.14% dan maks. 48.27%). Sedangkan perbedaan hasil antara perhitungan berdasarkan NORSOK STANDARD N-004 dan pemodelan elemen hingga, untuk batang tubular penyok tanpa *grout* memiliki perbedaan rata-rata sebesar 21.24% (min. -1.75% dan maks 41.25%), dan untuk batang tubular penyok dengan *grout* memiliki perbedaan rata-rata sebesar 32.18% (min. -1.4% dan maks 73.8%).

**Kata Kunci:** NORSOK STANDARD N-004, batang tubular penyok, pemodelan elemen hingga, sistem *fully grouted*.

**Abstract:** *Offshore platform structures are usually made of tubular steel. Damage can occur in tubular steel due to ship collision. One way to restore the tubular member capacity is to implement fully grouted system. Formulation of the axial compressive load capacity of the dented tubular members (ungrouted and grouted) already defined in NORSOK STANDARD N-004 (Design of Steel Structures). Manual calculation results based on this NORSOK STANDARD N-004 be compared and analyzed with the results from finite element modeling. This research shows that the increase in elastic Euler buckling load capacity of the average with NORSOK STANDARD N-004 calculations is 35.86% (min. 20.50% and max. 47.44%), and with finite element modeling is 46.30% (min. 44.14% dan max. 48.27%). While the difference in results between the manual calculations based on NORSOK STANDARD N-004 and finite element modeling have an average difference of 21.24% (min. -1.75% dan max 41.25%) for dented tubular members without grout and 32.18% (min. -1.4% dan max 73.8%) for dented tubular members with grout.*

**Keyword:** *NORSOK STANDARD N-004, dented tubular members, finite element modeling, fully grouted system.*

### PENDAHULUAN

Minyak dan gas bumi adalah sumber daya alam yang keberadaannya sangat krusial bagi kelangsungan kehidupan manusia. Bila dahulu

eksplorasi minyak dan gas bumi dilakukan di daratan saja, kini eksplorasi pun sudah beralih ke lautan. Untuk mengambil dan mengolah minyak yang berada di laut lepas pantai dibutuhkan suatu

struktur yang dinamakan *offshore platform*. Pada umumnya struktur ini menggunakan struktur baja tubular sebagai komponen utama penyusunnya. Batang tubular pada *offshore platform* dapat mengalami kerusakan akibat beban-beban yang terjadi misalnya seperti kerusakan berupa penyok akibat tabrakan kapal. Jika terjadi hal demikian, maka perlu dilakukan analisis terhadap kekuatan *existing structure* yang telah mengalami kerusakan tersebut agar dapat segera dilakukan perbaikan.

Dalam penelitian ini dikembangkan analisis keruntuhan atau kegagalan berupa tekuk (*buckling*) pada batang tubular dengan menggunakan *software* elemen hingga yang bernama Abaqus/CAE 6.10-1. Selanjutnya hasil analisis elemen hingga tersebut diverifikasi dengan sebuah perumusan yang mengacu pada hasil eksperimental sebelumnya, yaitu NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*).

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yang ingin dicapai, yaitu mengetahui kriteria keruntuhan atau kegagalan suatu batang tubular, mengetahui pemodelan batang tubular penyok yang tidak di-*grout* dan di-*grout* dengan menggunakan Abaqus /CAE 6.10-1, mengetahui perumusan mengenai batang tubular penyok yang tidak di-*grout* dan di-*grout* di dalam NORSOK STANDARD N-004 serta memverifikasi dan menganalisis hasil yang diperoleh dari pemodelan elemen hingga dengan hasil yang diperoleh dari NORSOK STANDARD N-004.

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Pada penelitian ini hanya akan dimodelkan batang tubular tidak rusak dan batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*).
- Penyok diasumsikan terdapat tepat pada bagian tengah batang tubular.
- Jenis sistem *grout* yang akan diterapkan adalah sistem *fully grouted*.
- Grout* diasumsikan mengisi penuh seluruh bagian batang tubular dan bersifat nonslip.
- Batang tubular hanya mengalami gaya aksial tekan hingga terjadi tekuk (*buckling*).
- Batang tubular dianggap tidak memiliki tegangan sisa.
- Analisis yang akan digunakan adalah analisis tekuk global (*global buckling*).
- Pemodelan dan analisis dengan menggunakan *software* elemen hingga akan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.
- Dasar perumusan yang dijadikan acuan untuk perhitungan manual kapasitas batang tubular

adalah NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*).

## METODE PENELITIAN

Berdasarkan pada tujuan penelitian, maka dilakukan metodologi penelitian yang lebih bersifat kualitatif, yaitu:

- Mempelajari latar belakang perumusan batang tubular dan penilaian ulang struktur batang tubular yang sudah ada di NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*).
- Mempelajari dan memahami konsep keruntuhan atau kegagalan berupa tekuk (*buckling*) pada batang tubular, baik yang terdapat pada standar NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*) maupun hasil *output* pemodelan elemen hingga dengan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.
- Melakukan pemodelan batang tubular dengan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.
- Melakukan verifikasi dan analisis terhadap hasil yang didapatkan dari *output* pemodelan elemen hingga dengan hasil yang didapatkan jika menggunakan NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*) untuk batang tubular.
- Mengambil kesimpulan dari hasil-hasil penelitian sekaligus menjawab tujuan penelitian dan memberikan saran yang dapat berguna untuk penelitian lanjutan.
- Penulisan laporan penelitian.

Secara keseluruhan, perencanaan dan pemeriksaan kekuatan dan stabilitas struktur baja yang akan dibahas dalam penelitian ini mengacu pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*).

### **Perencanaan Batang Tubular**

Pada struktur baja, semua pola kegagalan yang mungkin terjadi harus diidentifikasi dan diperiksa. Ini bertujuan agar tidak ada kondisi batas yang terlampaui. Kondisi batas adalah keadaan dimana struktur atau elemen-elemennya atau sambungan-sambungannya tidak mampu lagi memenuhi fungsi yang direncanakan. Dalam NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*), kondisi batas dikelompokkan menjadi:

- Kondisi Batas Layan (*Serviceability Limit States/SLS*)
- Kondisi Batas Akhir (*Ultimate Limit States/ULS*)
- Kondisi Batas Lelah (*Fatigue Limit States/FLS*)
- Kondisi Batas Insidental (*Accidental Limit States/ALS*)

Struktur anjungan lepas pantai tipe *jacket* memiliki beberapa komponen penting dimana pada setiap komponennya mungkin mengalami kegagalan berupa:

1. Keruntuhan pada komponen kaki (*legs*) dan pengaku (*braces*):
  - *Buckling* pada elemen batang tubular, yaitu *local buckling*, *global buckling*, dan *buckling* yang terjadi akibat tekanan luar.
  - Keruntuhan struktur secara keseluruhan yang diakibatkan beban lingkungan (misalnya: beban gelombang, arus, dan angin).
2. Keruntuhan pada sambungan.
3. *Fatigue* pada sambungan las.

Secara umum, setiap komponen pada struktur anjungan lepas pantai tipe *jacket* perlu dilakukan pemeriksaan Kondisi Batas Akhir (*Ultimate Limit States/ULS*), khususnya pada komponen kaki (*legs*).

Perencanaan dan pemeriksaan kekuatan dan stabilitas struktur baja yang akan dibahas dalam penelitian ini akan mengacu pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*). Dalam NORSOK, nilai faktor material (*material factor*/ $\gamma_M$ ) yang digunakan untuk melakukan pemeriksaan Kondisi Batas Akhir (*Ultimate Limit States/ULS*) adalah 1.15.

### 1. Persyaratan Umum Batang Tubular

Persyaratan umum mengenai kekuatan dan stabilitas batang tubular akan dijelaskan dalam sebagai berikut. Persyaratan yang diberikan berlaku untuk batang tubular tidak kaku atau kaku yang memiliki ketebalan  $t \geq 6$  mm dan  $D/t < 120$ . Berikut ini akan dijelaskan secara rinci mengenai persyaratan kekuatan dan stabilitas batang tubular yang hanya mengalami beban aksial tekan.

### 2. Gaya Aksial Tekan (*Axial Compression*)

Batang tubular yang mengalami gaya aksial tekan harus direncanakan memenuhi ketentuan berikut.

$$N_{Sd} \leq N_{c,Rd} = \frac{N_c}{\gamma_M} = \frac{A \cdot f_c}{\gamma_M} \quad (1)$$

Dimana:

$N_{Sd}$  = gaya aksial tekan rencana (bernilai positif)

$A$  = luas penampang

$f_c$  = kekuatan aksial tekan karakteristik

$\gamma_M$  = nilai faktor material

Dengan tidak adanya tekanan hidrostatis, kekuatan aksial tekan karakteristik untuk batang tubular akan menjadi lebih kecil dari kekuatan tekuk yang

masuk bidang (*in-plane*) atau keluar bidang (*out-of-plane*), yang ditentukan dari persamaan berikut.

$$f_c = \begin{cases} [1.0 - 0.28 \bar{\lambda}^2] f_y & \text{untuk } \bar{\lambda} \leq 1.34 \\ \frac{0.9}{\bar{\lambda}^2} f_y & \text{untuk } \bar{\lambda} > 1.34 \end{cases} \quad (2)$$

Dimana:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_{cl}}{f_E}} = \frac{k l}{\pi i} \sqrt{\frac{f_{cl}}{E}} \quad (3)$$

$f_{cl}$  = kekuatan tekuk lokal karakteristik

$\bar{\lambda} = \lambda =$  parameter kelangsingan kolom (*slenderness ratio*)

$f_E$  = kekuatan tekuk Euler terkecil pada arah y atau z

$E$  = modulus elastisitas Young ( $2.1 \times 10^5$  MPa)

$k$  = faktor panjang efektif, lihat Tabel 1

$l$  = panjang tanpa pengikat terpanjang pada arah y atau z

$i$  = jari-jari girasi

Kekuatan tekuk lokal karakteristik harus ditentukan dari:

$$f_{cl} = \begin{cases} f_y ; \frac{f_y}{f_{cle}} \leq 0.17 \\ \left(1.047 - 0.274 \frac{f_y}{f_{cle}}\right) f_y ; 0.17 < \frac{f_y}{f_{cle}} \leq 1.911 \\ f_{cle} ; \frac{f_y}{f_{cle}} > 1.911 \end{cases} \quad (4)$$

Dimana:

$f_{cle}$  = kekuatan tekuk lokal elastis karakteristik

$$f_{cle} = 2 C_e E \frac{t}{D} \quad (5)$$

$C_e$  = koefisien tekuk elastis kritis = 0.3

$D$  = diameter luar

$t$  = tebal dinding

### 3. Faktor Material (*Material Factor*)

Pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*), nilai faktor material,  $\gamma_M$ , diberikan sebagai berikut.

$$\gamma_M = \begin{cases} 1.15 & \text{untuk } \bar{\lambda}_s < 0.5 \\ 0.85 + 0.06 \bar{\lambda}_s & \text{untuk } 0.5 \leq \bar{\lambda}_s \leq 1.0 \\ 1.45 & \text{untuk } \bar{\lambda}_s > 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

Dimana:

$$\bar{\lambda}_s = \frac{|\sigma_{c,Sd}|}{f_{cl}} \lambda_c \quad (7)$$

$$\sigma_{c,Sd} = \frac{N_{Sd}}{A} \quad (8)$$

$N_{Sd}$  = gaya aksial tekan rencana (bernilai positif)

$A$  = luas penampang

$f_{cl}$  = dari Persamaan (4)

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cle}}} \quad (9)$$

$f_{cle}$  = dari Persamaan (5)

### 4. Faktor Panjang Efektif (*Effective Length Factor*)

Pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*), nilai faktor panjang efektif,  $k$ , diberikan sebagai berikut.

**Tabel 1. Faktor panjang efektif untuk pemeriksaan kekuatan member**

Elemen Struktur	K
Kaki <i>superstructure</i>	
- Pengaku	1.0
- Portal (tanpa pengaku)	K
Kaki <i>jacket</i> dan tiang pancang	
- Bagian komposit dengan <i>grout</i>	1.0
- Kaki <i>jacket</i> tanpa <i>grout</i>	1.0
- Tiang pancang tanpa <i>grout</i> antara <i>shim point</i>	1.0
Pengaku <i>jacket</i>	
- Pengaku diagonal dan horizontal primer	0.7
- Pengaku tipe-K	0.7
- Pangjang segmen dari pengaku tipe-X	0.8
- Pengaku horizontal sekunder	0.7

Sumber: NORSOK STANDARD N-004

### 5. Beban Kritis Dan Tegangan Kritis

Beban kritis suatu balok langsing yang dikenai beban aksial adalah nilai gaya aksial yang hanya cukup untuk mempertahankan batang dalam kondisi sedikit terdefleksi dan biasanya dinotasikan dengan  $P_{cr}$ .

Peralihan antara kondisi stabil dan kondisi tidak stabil terjadi pada gaya aksial khusus yang disebut beban kritis kolom ( $P_{cr}$ ). Rasio panjang kolom terhadap terhadap jari-jari minimum penampang melintang kolom disebut kelangsingan kolom =  $L/r$  dan tidak berdimensi.

Apabila suatu kolom adalah bebas berputar pada ujung-ujungnya, maka tekukan akan terjadi pada suatu sumbu dimana jari-jari adalah minimum.

Jika suatu kolom panjang yang mempunyai luas penampang tetap ditumpu di kedua ujungnya dan dikenai tekanan aksial, beban kritis kolom langsing panjang yang akan menyebabkan terjadinya tekukan dinyatakan dengan.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(KL)^2} \quad (10)$$

Dimana:

$P_{cr}$  = beban kritis

$E$  = modulus elastisitas

$I$  = momen luasan minimum penampang melintang terhadap sumbu yang melalui titik berat

$L$  = panjang kolom

$(KL)$  = panjang efektif kolom yang tergantung pada koefisien tekuk  $K$

**Tabel 2. Beban kritis, panjang efektif, dan faktor panjang efektif kolom ideal**

(a) Kolom sendi-sendi	(b) Kolom jepit-bebas	(c) Kolom jepit-jepit	(d) Kolom jepit-sendi
$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{2,046\pi^2 EI}{L^2}$
$L_e = L$	$L_e = 2L$	$L_e = 0,5L$	$L_e = 0,699L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0,5$	$K = 0,699$

Bentuk lain dari persamaan beban kritis:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(KL)^2} \left( \frac{i^2}{I} \right) = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left( \frac{KL}{i} \right)^2} \quad (11)$$

Dimana:

$A$  = luas penampang

$I$  = jari-jari girasi

### Pemeriksaan Ulang Struktur Baja

Sebuah struktur *existing* akan melalui suatu penilaian integritas (bobot) yang menunjukkan kemampuannya dengan tujuan jika terdapat salah satu atau lebih dari kondisi berikut.

- perpanjangan umur masa layan melebihi umur rencana perhitungan semula;
- kerusakan atau kondisi yang semakin memburuk pada komponen struktur utama;
- perubahan penggunaan yang menyalahi perencanaan semula atau dasar dari penilaian integritas sebelumnya;
- *departure form* dari dasar asli desain:
  - peningkatan beban pada struktur, dan
  - ketinggian *deck* tidak memadai.

Penilaian struktur *existing* harus berdasarkan pada informasi terkini yang dimiliki struktur. Karakteristik material dapat direvisi/diperbaiki dari nilai desain menjadi '*as built*' values (nilai-nilai aktual di lapangan). Data pondasi bangunan dapat diperbarui sesuai dengan hasil penyelidikan selama instalasi (pemasangan) dan data dari beberapa struktur yang berdekatan atau berada di sekitarnya (jika ada). Data pembebanan harus direvisi sesuai dengan data *met-ocean* terakhir dan tata letak struktur saat ini. Kedalaman air harus direvisi sesuai dengan data instalasi terukur dan *later scour and settlements*.

Integritas dari elemen struktur dan sistem harus

dievaluasi secara rasional (masuk akal), dengan pendekatan rekayasa yang dapat dipertahankan. Konsekuensi dari kejadian kecil atau perubahan struktural kecil mungkin dalam kebanyakan kasus akan cukup dievaluasi dibandingkan dengan dokumentasi teknik *existing* untuk struktur yang bersangkutan. Jika ini gagal untuk melengkapi dokumentasi yang diperlukan, analisis tambahan akan diperlukan, baik menggunakan pengecekan *conventional design-level* (desain level konvensional) atau metode analisis nonlinier *second-order* (nonlinier orde kedua).

### 1. Pemeriksaan Batang Tubular Penyok

Kekuatan utama dari *member* yang rusak harus dievaluasi secara rasional (masuk akal), dengan pendekatan rekayasa yang dapat dibenarkan. Sebagai kemungkinan lain, kekuatan *member* yang rusak dapat ditentukan dengan analisis murni/halus.

*Member* atau *joints* yang terkorosi atau rusak harus dimodelkan untuk mewakili karakteristik (sifat) karat atau rusak yang sebenarnya. *Member* dan *joints* yang diperkuat atau diperbaiki harus dimodelkan untuk mewakili karakteristik sifat penguatan atau perbaikan sebenarnya.

- Gaya Aksial Tekan (*Axial Compression*)

Batang tubular penyok yang mengalami gaya aksial tekan harus direncanakan memenuhi ketentuan berikut:

$$N_{Sd} \leq N_{dent,c,Rd} = \frac{N_{dent,c}}{\gamma_M} \quad (12)$$

Dimana:

$$N_{dent,c} = \begin{cases} (1.0 - 0.28\bar{\lambda}_d^2) \xi_C f_y A_0 & ; \bar{\lambda}_d \leq 1.34 \\ \frac{0.9}{\bar{\lambda}_d^2} \xi_C f_y A_0 & ; \bar{\lambda}_d > 1.34 \end{cases} \quad (13)$$

$N_{dent,c,Rd}$  = kapasitas aksial tekan rencana dari bagian yang penyok

$N_{dent,c}$  = kapasitas aksial tekan karakteristik dari *member* yang penyok

$\bar{\lambda}_d$  = pengurangan kelangsingan dari *member* yang penyok

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{\xi_C}{\xi_M}} \bar{\lambda}_0 \quad (14)$$

$\bar{\lambda}_0$  = pengurangan kelangsingan dari *member* yang tidak rusak

$$\xi_C = \exp\left(-0.08 \frac{\delta}{t}\right) \quad \text{untuk } \frac{\delta}{t} < 10 \quad (15)$$

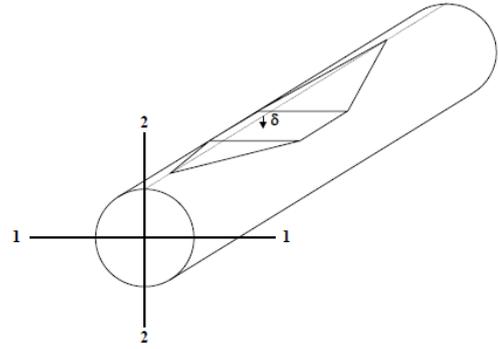
$$\xi_M = \exp\left(-0.06 \frac{\delta}{t}\right) \quad \text{untuk } \frac{\delta}{t} < 10 \quad (16)$$

$A_0$  = luas penampang dari bagian yang tidak rusak

$\delta$  = kedalaman penyok

$t$  = tebal

$\gamma_M$  = faktor material



**Gambar 1. Definisi sumbu untuk bagian yang penyok**

### 2. Perkuatan Batang Tubular Penyok dengan Metode *Grouting*

Kekuatan utama anggota diperbaiki dan sendi harus dievaluasi dengan menggunakan pendekatan rekayasa rasional, dan dapat dibenarkan. Atau, kekuatan anggota diperbaiki dan sendi dapat ditentukan dengan analisis halus. Ketahanan dari *grouted tubular member*, dengan dan tanpa penyok, dapat ditentukan sesuai dengan paragraf berikut.

- Gaya Aksial Tekan (*Axial Compression*)

Ketahanan dari *grouted tubular member* yang mengalami gaya aksial tekan harus direncanakan untuk memenuhi ketentuan berikut:

$$N_{Sd} \leq N_{cg,Rd} = \frac{N_{cg}}{\gamma_M} \quad (17)$$

Dimana:

$$N_{cg} = \begin{cases} (1.0 - 0.28\bar{\lambda}_g^2) N_{ug} & ; \bar{\lambda}_g \leq 1.34 \\ \frac{0.9}{\bar{\lambda}_g^2} N_{ug} & ; \bar{\lambda}_g > 1.34 \end{cases} \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}_g = \sqrt{\frac{N_{ug}}{N_{eg}}} \quad (19)$$

$N_{Sd}$  = gaya aksial rencana pada bagian *grout*

$N_{cg,Rd}$  = ketahanan aksial tekan rencana dari anggota *grout*

$N_{ug}$  = ketahanan aksial leleh dari penampang komposit

$$N_{ug} = A_S f_y + 0.67 A_G f_{cg} \quad (20)$$

$N_{eg}$  = beban tekuk Euler elastik dari anggota *grout*

$$N_{eg} = \pi^2 \frac{E_S I_S + 0.8 E_G I_G}{(k l)^2} \quad (21)$$

$f_{cg}$  = kekuatan karakteristik dari *grout*

$A_S$  = luas penampang baja

$$A_S = \begin{cases} \pi D t & ; \text{bagian tidak rusak} \\ \pi D t \left(1 - \frac{\alpha - \sin \alpha}{\pi}\right) & ; \text{bagian penyok} \end{cases} \quad (22)$$

$A_G$  = luas penampang *grout*

$$A_G = \begin{cases} \pi \frac{D_G^2}{4} & ; \text{bagian tidak rusak} \\ \pi \frac{D^2}{4} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1 \sin 2\alpha}{2\pi}\right) & ; \text{bagian penyok} \end{cases} \quad (23)$$

$I_S$  = momen inersia efektif dari penampang baja

$$I_S = \pi \frac{D^3 t}{8} \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{2 \sin \alpha (\cos \alpha)^2}{\pi} \right) - A_S e_S^2 \quad (24)$$

$I_G$  = momen inersia efektif dari penampang baja

$$I_G = \pi \frac{D_G^4}{64} \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 4\alpha}{4\pi} \right) - A_G e_G^2 \quad (25)$$

$E_S$  = modulus elastisitas baja

$E_G$  = modulus elastisitas grout

$$m = \frac{E_S}{E_G} \quad (26)$$

$m \approx 18$  (jika tidak terdapat data aktual)

$e_S$  = jarak dari centroid bagian baja penyok ke centroid bagian baja utuh

$$e_S = \frac{D^2 t \sin \alpha (1 - \cos \alpha)}{2 A_S} \quad (27)$$

$e_G$  = jarak dari centroid bagian grout penyok ke centroid bagian grout utuh

$$e_G = \frac{(D_G \sin \alpha)^3}{12 A_G} \quad (28)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( 1 - 2 \frac{\delta}{D} \right) \quad (29)$$

$\delta$  = kedalaman penyok

$D$  = diameter

### Pemodelan Elemen Hingga

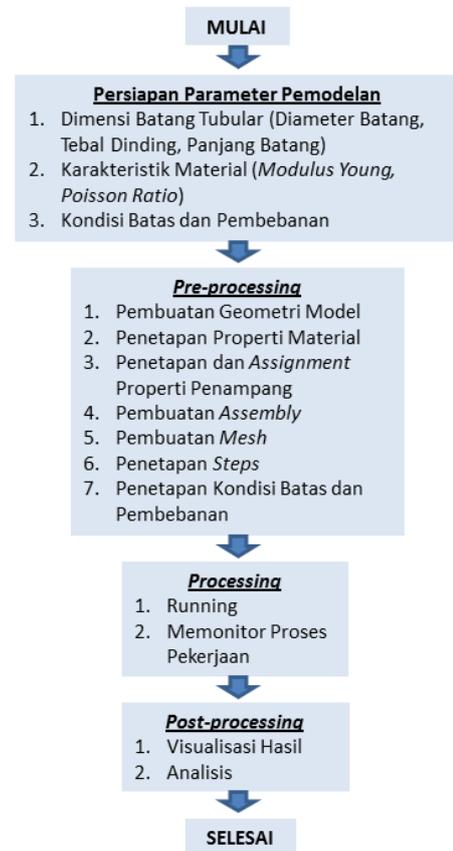
Abaqus/CAE 6.10-1 merupakan salah satu perangkat lunak yang sering digunakan untuk analisis metode elemen hingga dan *computer aided-design*. Mulai dari simulasi linier yang relatif sederhana sampai dengan analisis nonlinier dengan kondisi kontak yang kompleks dan rumit. Abaqus/CAE 6.10-1 memiliki cakupan material yang cukup luas sehingga mudah dalam memodelkan secara visual. Perangkat lunak ini dilengkapi dengan kemampuan analisis *multiphysics* yang dapat digunakan dalam berbagai bidang sesuai dengan kebutuhan.

Analisis metode elemen hingga pada Abaqus/CAE 6.10-1 terdiri dari tiga tahap, yaitu:

1. *Pre-processing* atau pemodelan, tahap ini merupakan tahap pembuatan *file input*.
2. *Processing* atau pengolahan, pemecahan masalah dalam bentuk *file* visual dengan analisis metode elemen hingga.
3. *Post-processing*, merupakan *output* dari *file* visual dalam bentuk gambar, animasi, dan lain-lain.

#### A. Flowchart dan Parameter Pemodelan

Diagram alir proses analisis metode elemen hingga menggunakan *software* Abaqus/CAE 6.10-1 ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. Flowchart pemodelan Abaqus/CAE 6.10-1

Baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis baja dengan penampang *Circular Hollow Section (CHS)* berdiameter 260 mm dan ketebalan 9 mm. Berikut ini parameter pemodelan batang tubular yang terbuat dari baja tersebut.

Tabel 3. Properti batang tubular

Properties		Nilai		Ket
Diameter Chord	D	260	mm	-
Thickness Chord	t	9	mm	-
Coefficient Buckling	K	1		Tabel NORSOK
Length Member	L	12000	mm	-
Inersia Member	I	104870041.1	mm <sup>4</sup>	-
Cross Section Area	A	8750.906337	mm <sup>2</sup>	-
Volume	V	105010876	mm <sup>3</sup>	-
Mass of Member	m	0.824335377	ton	-

Tabel 4. Properti material baja

Properties		Nilai		Ket
Elastic Modulus of Steel	Es	200000	MPa	-
Density of Steel	ps	7.85E-09	ton/mm <sup>3</sup>	-
Yield Strength Member	fy	240	MPa	-
Poisson Ratio	v	0.3		-
Plastic Modulus of Steel (Ps)				
		Teg. Leleh	Reg. Plastis	
		400	0	
		400	0.03	
		460	0.05	
		500	0.08	

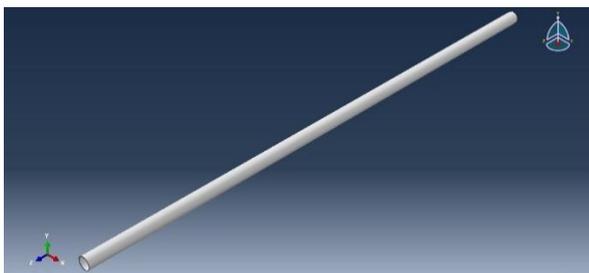
**Tabel 5. Properti material grout**

Properties		Nilai		Ket
Elastic Modulus of Grout	Eg	30277.63	MPa	-
Density of Grout	pg	2.40E-09	ton/mm <sup>3</sup>	-
Cube Strength of Grout	fc	41.5	MPa	-
Poisson Ratio	v	0.2		-
Plasti Modulus of Grout (Pg)				
		Teg. Leleh	Reg. Plastis	
		41.5	0	
		41.5	0.003	
		15	0.01	
		8.5	0.05	
		8.5	0.1	

### B. Pemodelan Batang Tubular Tidak Rusak

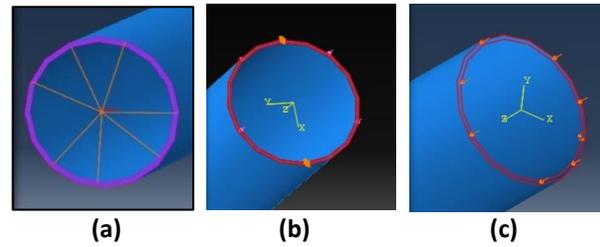
Tahapan *pre-processing* terdiri dari pembuatan geometri model, penetapan properti material, penetapan dan *assignment* properti penampang, pembuatan *assembly*, pembuatan *mesh*, penetapan *steps*, serta penetapan kondisi batas dan pembebanan. Perlu digarisbawahi bahwa Abaqus/CAE 6.10-1 adalah program numerik, dan karena itu tidak memiliki *default units*. Oleh karena itu, satuan yang digunakan untuk mendefinisikan geometri, beban, properti material, dan lain-lainnya harus konsisten.

Dalam penelitian ini, model 3-dimensi dari batang tubular akan dibuat dengan menggunakan bantuan *software* elemen hingga Abaqus/CAE 6.10-1. Batang tubular dimodelkan sesuai dengan dimensi yang direncanakan (diameter batang sebesar 260 mm, tebal dinding sebesar 9 mm, dan panjang batang sebesar 12000 mm). Hasil akhir pemodelan ditunjukkan pada gambar berikut.



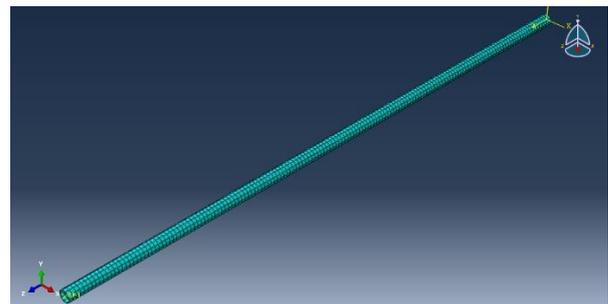
**Gambar 3. Pemodelan batang tubular utuh di Abaqus/CAE 6.10-1**

Setelah memodelkan geometri batang tubular, lalu properti dari baja tubular yang digunakan di-*define* dan di-*assign*. Selanjutnya dilakukan pembuatan *assembly* pada model. Setelah itu diberikan *boundary condition* berupa tahanan sendi-rol di kedua ujung batang tubular. Pemodelan tumpuan sendi pada Abaqus/CAE 6.10-1 menggunakan *constraints*.



**Gambar 4. (a) Constraints pada tumpuan sendi di Abaqus/CAE 6.10-1; (b) Boundary condition tumpuan rol di Abaqus/CAE 6.10-1; (c) Beban aksial tekan di Abaqus/CAE 6.10-1**

Setelah semua *boundary condition* dimasukkan ke dalam pemodelan, lalu diberikanlah beban aksial tekan sebesar 1500000 N ke dalam model tersebut dan dilakukanlah proses *meshing*. Sebelum melakukan *meshing* harus dilakukan partisi-partisi terlebih dahulu agar struktur dapat di-*mesh* dan juga mempartisi daerah yang akan mendapatkan mesh yang lebih detail. Dalam kasus ini jenis elemen yang digunakan adalah *S4R* (A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains). Penggunaan *S4R* dikarenakan elemen ini memberikan akurasi yang baik, tetapi cepat dalam proses *run*-nya sehingga dapat menghemat *CPU-Time*. Elemen *S4R* adalah elemen *shell* (2 dimensi), yang memiliki orde 1 terdiri dari 4 titik (*node*) dengan masing-masing titik terdiri dari 3 derajat kebebasan (translasi arah x, translasi arah y, translasi arah z).

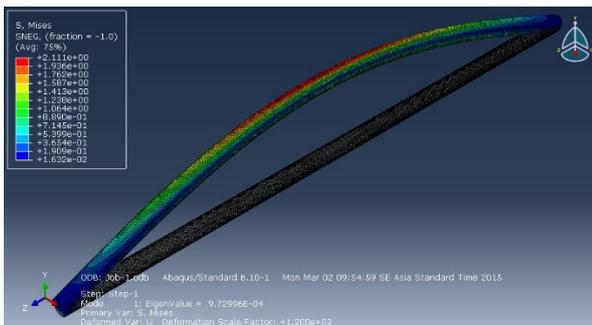


**Gambar 5. Meshing batang tubular tidak rusak di Abaqus/CAE 6.10-1 dengan menggunakan elemen S4R**

*Mesh* yang relatif kasar (ukuran partisi yang besar) akan memberikan hasil dengan tingkat akurasi yang sedang, sementara waktu yang dibutuhkan untuk proses *running* lebih cepat. Sedangkan, *mesh* yang halus (ukuran partisi yang kecil) akan memberikan hasil yang lebih akurat namun membutuhkan waktu yang lebih lama ketika proses *running*.

Jenis elemen yang digunakan sebelum melakukan

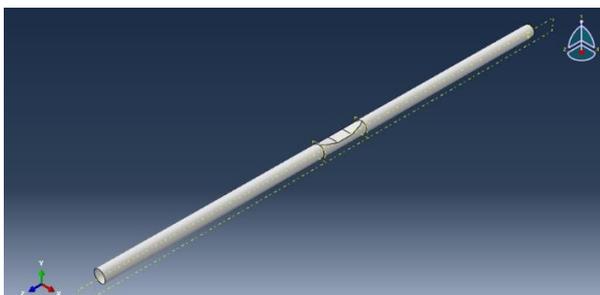
*mesh* pada model harus dipertimbangkan dengan hati-hati. Jenis elemen yang berbeda dapat membuat perbedaan yang signifikan. Setelah dilakukan *meshing*, lalu model akan masuk pada tahapan *processing*. Tahapan *processing* terdiri dari proses *running* dan *monitoring*. Setelah proses *run* selesai dan berhasil (*The analysis has completed successfully*), *output* dari pemodelan yang telah dibuat dapat dilihat dalam bentuk visualisasi hasil. Tahapan *post-processing* terdiri dari visualisasi hasil dan analisis. Berikut hasil visualisasi distribusi tegangan pada batang tubular tidak rusak yang diperoleh dengan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.



**Gambar 6. Hasil visualisasi tekuk batang tubular tidak rusak di Abaqus/CAE 6.10-1**

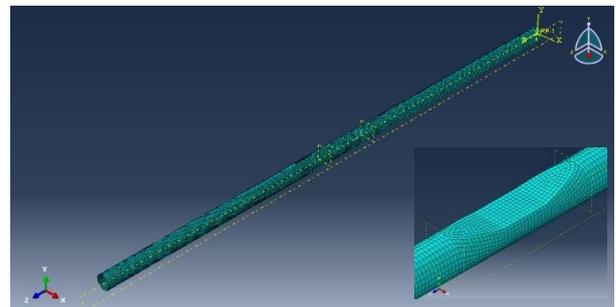
### C. Pemodelan Batang Tubular Penyok Tanpa Grout

Dalam penelitian ini, model 3-dimensi dari batang tubular penyok juga dikerjakan dengan menggunakan bantuan *software* elemen hingga Abaqus/CAE 6.10-1. Batang tubular penyok dimodelkan sesuai dengan dimensi yang direncanakan (diameter batang sebesar 260 mm, tebal dinding sebesar 9 mm, dan panjang batang sebesar 12000 mm). Hasil akhir pemodelan ditunjukkan pada gambar berikut.



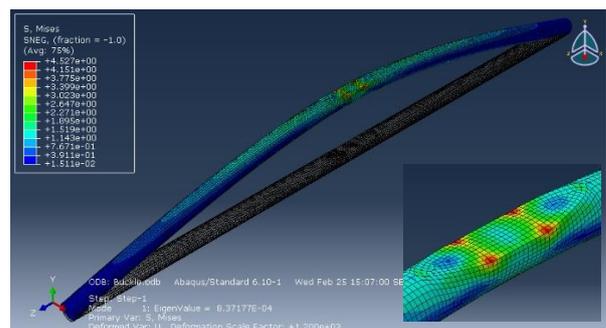
**Gambar 7. Pemodelan batang tubular penyok di Abaqus/CAE 6.10-1**

Berikut hasil proses *meshing* pada pemodelan batang tubular penyok dengan jenis elemen *S4R*.



**Gambar 8. Meshing batang tubular penyok di Abaqus/CAE 6.10-1 dengan menggunakan elemen S4R**

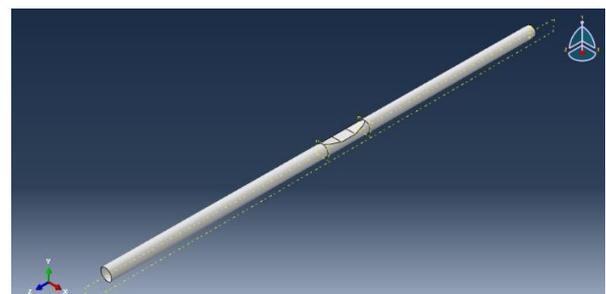
Berikut hasil visualisasi distribusi tegangan pada batang tubular penyok yang diperoleh dengan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.



**Gambar 9. Hasil visualisasi tekuk batang tubular penyok di Abaqus/CAE 6.10-1**

### D. Pemodelan Batang Tubular Penyok dengan Grout

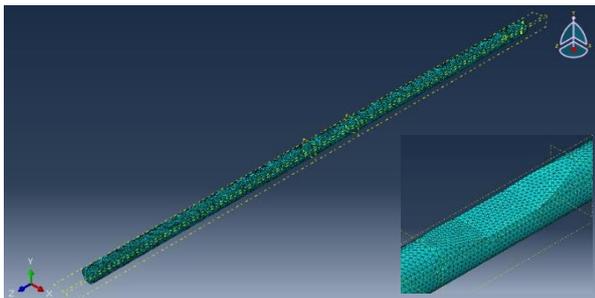
Dalam penelitian ini, model 3-dimensi dari batang tubular penyok dengan *grout* juga dikerjakan dengan menggunakan bantuan *software* elemen hingga Abaqus/CAE 6.10-1. Batang tubular penyok dengan *grout* dimodelkan sesuai dengan dimensi *grout* yang direncanakan (diameter *grout* sebesar 242 mm dan panjangnya 12000 mm). Hasil akhir pemodelan ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 10. Pemodelan bagian grout di Abaqus/CAE 6.10-1**

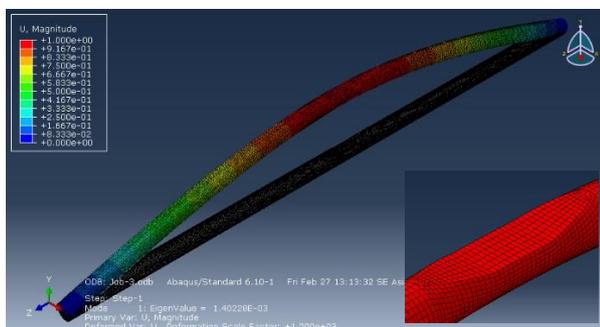
Berikut hasil proses *meshing* pada pemodelan batang tubular penyok dengan *grout* dengan

menggunakan jenis elemen *meshing C3D10 (A 10-node quadratic tetrahedron)*. Penggunaan *C3D10* dikarenakan hanya elemen ini yang mampu mendefinisikan bentuk geometri model *grout* yang terdapat bagian penyok di tengah bentangnya.



**Gambar 11. Meshing bagian grout di Abaqus/CAE 6.10-1 dengan menggunakan elemen C3D10**

Berikut hasil visualisasi distribusi tegangan pada batang tubular penyok dengan *grout* yang diperoleh dengan menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1.



**Gambar 12. Hasil visualisasi tekuk batang tubular penyok dengan grout di Abaqus/CAE 6.10-1**

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Hasil Perhitungan Menggunakan NORSOK STANDARD N-004 (Untuk $\lambda = 1.49$ )*

Fenomena *global buckling* merupakan sebuah kasus dimana struktur mengalami kegagalan akibat gaya aksial tekan. Ditinjau dari segi mekanika, maka *global buckling* pada batang tubular yang panjang dapat dimodelkan atau dianggap sebagai kolom yang mengalami beban aksial tekan.

Sebuah kolom vertikal yang diberikan besar gaya aksial tekan tertentu dapat mengalami tekukan ke arah samping. Besarnya gaya aksial tekan yang dibutuhkan agar kolom dapat mengalami tekukan bergantung pada geometri penampang kolom dan panjang kolom itu sendiri. Selain itu juga penekukan kolom sangat dipengaruhi oleh kondisi tumpuan di ujung-ujung kolom tersebut.

Pada penelitian ini, batang tubular vertikal diberikan tumpuan sendi pada ujung bagian bawah agar dapat menahan gaya horizontal dan gaya vertikal. Sedangkan, pada ujung bagian atas diberikan tumpuan rol. Ini bertujuan agar ujung bagian atas batang tubular tetap dapat bergerak dalam arah vertikal sebagai bentuk respon ketika diberikan gaya aksial tekan dari atas. Setelah batang tubular dimodelkan sebagai kolom dengan ujung-ujung sendi-rol, maka dapat dihitung beban kritis yang akan menyebabkan kolom mengalami tekuk (*buckling*).

### *A. Hasil Perhitungan Beban Kritis, Tegangan Kritis, dan Slenderness Ratio*

Beban kritis (beban tekuk Euler) dan tegangan kritis (tegangan tekuk Euler) diperoleh dengan pendekatan tekuk Euler pada kondisi tekuk elastis. Berikut hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan (10) dan (11).

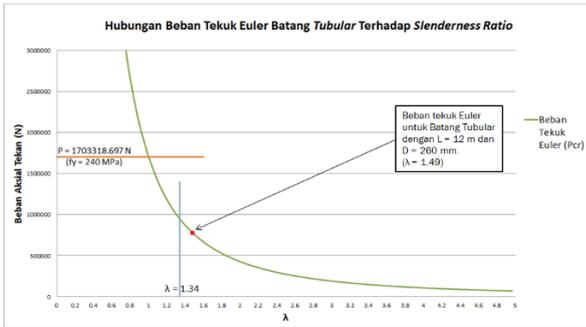
Beban Kritis:  
 $P_{cr} = 767094.413 \text{ N}$

Tegangan Kritis:  
 $\sigma_{cr} = 108.089 \text{ MPa}$

Dengan menggunakan Persamaan (3), (4), dan (5) dapat diperoleh hasil parameter rasio kelangsingan batang tubular dengan panjang 12000 mm, berdiameter 260 mm, dan ketebalan dinding sebesar 9 mm, yaitu sebagai berikut.

*Slenderness Ratio*:  
 $\lambda = 1.49$

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, persamaan beban tekuk Euler (beban kritis) dinyatakan sebagai  $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$ . Melalui persamaan ini, dapat diketahui bahwa besarnya beban tekuk Euler tergantung pada penampang kolom, kondisi tumpuan pada ujung-ujung kolom, dan panjang kolom. Untuk panjang kolom, semakin panjang kolom tersebut, maka beban tekuk Euler akan semakin kecil. Tentunya ini tidak diharapkan dalam perencanaan struktur batang tekan. Hubungan beban tekuk Euler terhadap *slenderness ratio* batang tubular (sebagai kolom) secara grafis dapat ditunjukkan pada gambar berikut ini.



**Gambar 13. Hubungan beban tekuk Euler batang tubular terhadap *slenderness ratio* (perhitungan manual beban kritis)**

Dari gambar dapat diketahui hubungan beban tekuk terhadap panjang batang tubular. Jika batang tubular semakin panjang, maka beban minimum yang dibutuhkan agar batang mengalami tekuk (*buckling*) akan semakin kecil. Ini berarti batang yang sangat panjang cenderung akan mudah mengalami penekukan secara global. Sedangkan pada batang pendek, batang sulit mengalami penekukan secara global, akan tetapi terjadi tekukan lokal pada dinding batang, atau batang tersebut akan mengalami deformasi plastis dengan tegangan yang lebih besar daripada tegangan kritis saat tekuk.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pada kasus ini, batang tubular dengan panjang 12000 mm ( $\lambda = 1.49$ ) memiliki nilai beban tekuk Euler sebesar  $P_{cr} = 767094.413$  N. Ini berarti batang tubular tidak akan mengalami deformasi plastis karena terlebih dahulu telah mengalami kegagalan struktur dalam bentuk *global buckling*.

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, persamaan tegangan tekuk Euler (tegangan kritis saat tekuk) dapat dinyatakan sebagai  $\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$ . Menurut perhitungan tegangan kritis, diperoleh tegangan minimum yang akan menyebabkan tekuk yaitu sebesar  $\sigma_{cr} = 108.089$  MPa. Dibandingkan dengan tegangan leleh material baja dari batang tubular ini yaitu sebesar  $f_y = 240$  MPa (saat  $P = 1703318.697$  N), maka tegangan kritis ini masih jauh lebih kecil. Atau bisa dikatakan bahwa batang tubular tersebut telah gagal pada tegangan 108.089 MPa sebelum tercapai deformasi plastis pada tegangan 240 MPa.

#### B. Hasil Perhitungan Kapasitas Batang Tubular Tidak Rusak

Perhitungan manual untuk kapasitas batang tubular tidak rusak didasarkan pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Berikut

*resume* perolehan hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan (1), (2), dan (3).

Hasil perhitungan:

$$f_c = 97.280 \text{ MPa}$$

$$N_c = 690384.972 \text{ N}$$

$$N_{c,Rd} = 600334.758 \text{ N}$$

$$N_e = 767094.413 \text{ N}$$

Dikarenakan penelitian ini bertujuan untuk mengamati kondisi batang tubular yang mengalami penyok akibat beban yang berlebih, maka perlu dicari nilai beban kritis pada kondisi tekuk elastis dengan pendekatan tekuk Euler. Selanjutnya dimodelkan batang tubular yang mengalami tekuk dengan besar defleksi atau kedalaman tekuk sebesar 80 mm.

Untuk nilai faktor material, berikut *resume* perolehan hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan (6), (7), (8), dan (9).

Hasil perhitungan:

$$\sigma_{c,sd} = 211.361 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c = 0.240$$

$$\bar{\lambda}_s = 0.212$$

$$\gamma_M = 1.15$$

#### C. Hasil Perhitungan Kapasitas Batang Tubular Penyok Tanpa Grout

Perhitungan manual untuk kapasitas batang tubular penyok tanpa *grout* didasarkan pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Berikut ini merupakan *resume* perolehan hasil perhitungan ketahanan dari batang tubular penyok untuk kedalaman penyok 80 mm (tanpa *grout*) yang mengalami gaya aksial tekan. Perhitungan dikerjakan dengan menggunakan Persamaan (13), (14), (15), dan (16).

Hasil perhitungan:

$$\frac{\delta}{t} = 8.889$$

$$\xi_c = 0.491$$

$$\xi_M = 0.587$$

$$\bar{\lambda}_0 = 1.490$$

$$\bar{\lambda}_d = 1.363$$

$$N_{dent,c} = 405011.734 \text{ N}$$

$$N_{dent,c,Rd} = 352184.116 \text{ N}$$

$$N_{dent,e} = 450013.037 \text{ N}$$

Dari hasil perhitungan di atas diketahui nilai beban aksial tekan karakteristik batang tubular penyok tanpa *grout* untuk kedalaman penyok 80 mm sebesar **405011.734 N**.

#### D. Hasil Perhitungan Kapasitas Batang Tubular Penyok Dengan Grout

Perhitungan manual kapasitas batang tubular penyok dengan *grout* didasarkan pada NORSOK STANDARD N-004 (*Design of Steel Structures*) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Berikut ini merupakan *resume* perolehan hasil perhitungan ketahanan dari batang tubular penyok untuk kedalaman penyok 80 mm (dengan *grout*) yang mengalami gaya aksial tekan. Perhitungan dikerjakan dengan menggunakan Persamaan (18) s/d (29).

Hasil perhitungan:

$$\alpha = 67.38$$

$$A_S \text{ utuh} = 7351.327 \text{ mm}^2$$

$$A_S \text{ penyok} = 4637.174 \text{ mm}^2$$

$$A_G \text{ utuh} = 45996.058 \text{ mm}^2$$

$$A_G \text{ penyok} = 28868.888 \text{ mm}^2$$

$$N_{ug} \text{ utuh} = 3043238.828 \text{ N}$$

$$N_{ug} \text{ penyok} = 1915621.122 \text{ N}$$

$$e_S = 37.264 \text{ mm}$$

$$I_S \text{ utuh} = 62118711.54 \text{ mm}^3$$

$$I_S \text{ penyok} = 32398053.71 \text{ mm}^3$$

$$e_G = 39.905 \text{ mm}$$

$$I_G \text{ utuh} = 168357071.4 \text{ mm}^3$$

$$I_G \text{ penyok} = 59131417.79 \text{ mm}^3$$

$$N_{eg} \text{ utuh} = 1131009.016 \text{ N}$$

$$N_{eg} \text{ penyok} = 542272.946 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda}_g \text{ utuh} = 1.640$$

$$\bar{\lambda}_g \text{ penyok} = 1.880$$

$$N_{cg} \text{ utuh} = 1017908.115 \text{ N}$$

$$N_{cg} \text{ penyok} = 488045.652 \text{ N}$$

$$N_{cg,Rd} \text{ utuh} = 885137.491 \text{ N}$$

$$N_{cg,Rd} \text{ penyok} = 424387.523 \text{ N}$$

Dari hasil perhitungan di atas diketahui nilai beban aksial tekan karakteristik batang tubular penyok (kedalaman penyok 80 mm) dengan *grout* sebesar **488045.652 N**.

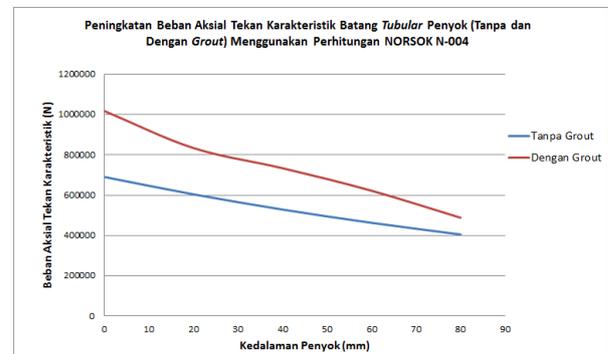
Berikut disajikan tabel perbandingan nilai beban aksial tekan karakteristik batang tubular penyok

tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004.

**Tabel 6. Perbandingan nilai beban aksial tekan karakteristik batang tubular penyok tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004**

Dent Depth $\delta$ (mm)	Characteristic Axial Compression of Damage Member with NORSOK		Percentage of Increment %
	Without Grout $N_{dent,c}$ (N)	With Grout $N_{cg}$ (N)	
0	690384.972	1017908.115	47.44
20	604206.507	834187.620	38.06
40	528785.414	734079.603	38.82
60	462778.886	622315.168	34.47
80	405011.734	488045.652	20.50

Secara umum terlihat adanya peningkatan nilai beban aksial tekan karakteristik ketika batang tubular diberikan *grouting*. Berikut hasilnya terlihat dalam bentuk gambar. Garis berwarna biru adalah nilai beban aksial tekan karakteristik dari batang tubular penyok tanpa *grout*, sedangkan garis berwarna merah adalah nilai beban aksial tekan karakteristik dari batang tubular penyok setelah di-*grout*.



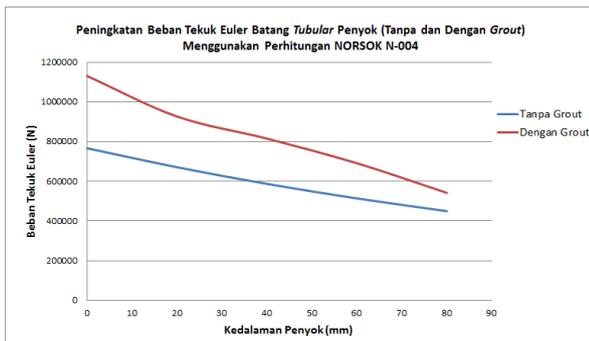
**Gambar 14. Kurva peningkatan beban aksial tekan karakteristik batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004**

Dari hasil perhitungan sebelumnya juga diketahui nilai beban tekuk elastis Euler batang tubular utuh (tidak rusak) dengan *grout* sebesar **1131009.016 N** dan nilai beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok (kedalaman penyok 80 mm) dengan *grout* sebesar **542272.946 N**. Berikut disajikan tabel perbandingan nilai beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004.

**Tabel 7. Perbandingan nilai beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004**

Dent Depth	Elastic Euler Buckling Load of Damage Member with NORSOK		Percentage of Increment
	Without Grout	With Grout	
$\delta$ (mm)	Ndent,e (N)	Neg (N)	%
0	767094.413	1131009.016	47.44
20	671340.563	926875.1334	38.06
40	587539.349	815644.0031	38.82
60	514198.762	691461.2983	34.47
80	450013.037	542272.9461	20.50

Secara umum terlihat adanya peningkatan nilai beban tekuk elastis Euler ketika batang tubular diberikan *grouting*. Berikut hasilnya terlihat dalam bentuk gambar. Garis berwarna biru adalah nilai beban tekuk elastis Euler dari batang tubular penyok tanpa *grout*, sedangkan garis berwarna merah adalah nilai beban tekuk elastis Euler dari batang tubular penyok setelah di-*grout*.



**Gambar 15.** Kurva peningkatan beban tekuk Euler batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004

**Hasil Perhitungan Menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1 (Untuk  $\lambda = 1.49$ )**

**A. Batang Tubular Penyok Tanpa Grout**

Berikut disajikan tabel hasil perolehan nilai Eigen dan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dengan menggunakan program Abaqus/CAE 6.10-1.

**Tabel 8.** Hasil perolehan nilai Eigen dan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok tanpa *grout* menggunakan program Abaqus/CAE 6.10-1

Dent Depth	EigenValue (ABAQUS)	Elastic Euler Buckling Load (Without Grout)
$\delta$ (mm)	EV	Pcr (N)
0	6.37161E-04	753640.169
20	6.29491E-04	744568.019
40	6.08876E-04	720184.399
60	5.79165E-04	685041.942
80	5.37413E-04	635657.274

**B. Batang Tubular Penyok Dengan Grout**

Berikut disajikan tabel hasil perolehan nilai Eigen dan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok dengan *grout* dengan menggunakan program Abaqus/CAE 6.10-1.

**Tabel 9.** Hasil perolehan nilai Eigen dan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok dengan *grout* menggunakan program Abaqus/CAE 6.10-1

Dent Depth	EigenValue (ABAQUS)	Elastic Euler Buckling Load (With Grout)
$\delta$ (mm)	EV	Pcr,g (N)
0	9.42783E-04	1115132.815
20	9.07370E-04	1073245.978
40	8.87617E-04	1049881.939
60	8.41744E-04	995622.913
80	7.96812E-04	942476.910

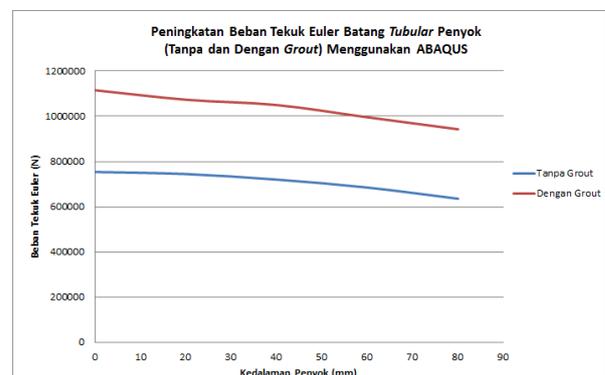
**C. Perbandingan Batang Tubular Penyok Tanpa Grout dan Dengan Grout**

Pada bagian ini dilakukan analisis perbandingan dari hasil peningkatan beban tekuk Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1. Secara umum terlihat adanya peningkatan nilai beban tekuk Euler ketika batang tubular diberikan *grouting*. Berikut hasilnya dalam bentuk tabel.

**Tabel 10.** Peningkatan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) menggunakan program Abaqus/CAE 6.10-1

Dent Depth	Elastic Euler Buckling Load of Damage Member with ABAQUS		Percentage of Increment
	Without Grout	With Grout	
$\delta$ (mm)	Pcr (N)	Pcr,g (N)	%
0	753640.17	1115132.815	47.97
20	744568.02	1073245.978	44.14
40	720184.40	1049881.939	45.78
60	685041.94	995622.913	45.34
80	635657.27	942476.910	48.27

Berikut hasil perbandingan disajikan dalam bentuk gambar.



**Gambar 16.** Kurva peningkatan beban tekuk elastis Euler batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) menggunakan ABAQUS/CAE 6.10-1

**Perbandingan Hasil Perhitungan Menggunakan NORSOK STANDARD N-004 dan ABAQUS/CAE 6.10-1 (Untuk  $\lambda = 1.49$ )**

• Untuk Batang Tubular Penyok Tanpa Grout  
Berikut disajikan tabel perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok tanpa *grout*

menggunakan NORSOK STANDARD N-004 dan Abaqus/CAE 6.10-1.

**Tabel 11. Perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dengan menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004 dan program ABAQUS/CAE 6.10-1**

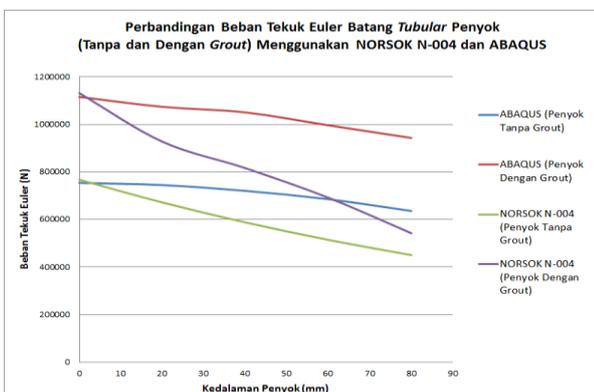
Dent Depth	Elastic Euler Buckling Load of Damage Member (Without Grout)		Error
	NORSOK	ABAQUS	
$\delta$ (mm)	Ndent,e (N)	Pcr (N)	%
0	767094.413	753640.169	-1.75
20	671340.563	744568.019	10.91
40	587539.349	720184.399	22.58
60	514198.762	685041.942	33.23
80	450013.037	635657.274	41.25

- *Untuk Batang Tubular Penyok Dengan Grout*  
Berikut disajikan tabel perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok dengan *grout* menggunakan NORSOK STANDARD N-004 dan Abaqus/CAE 6.10-1.

**Tabel 12. Perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok dengan *grout* dengan menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004 dan program ABAQUS/CAE 6.10-1**

Dent Depth	Elastic Euler Buckling Load of Damage Member (With Grout)		Error
	NORSOK	ABAQUS	
$\delta$ (mm)	Neg (N)	Pcr,g (N)	%
0	1131009.016	1115132.815	-1.40
20	926875.133	1073245.978	15.79
40	815644.003	1049881.939	28.72
60	691461.298	995622.913	43.99
80	542272.946	942476.910	73.80

- *Perbandingan Batang Tubular Penyok Tanpa Grout dan Dengan Grout*  
Berikut kurva perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok tanpa *grout* dan dengan *grout* menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004 dan program Abaqus/CAE 6.10-1.



**Gambar 17. Kurva perbandingan beban tekuk Euler batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) menggunakan perumusan NORSOK STANDARD N-004 dan program Abaqus/CAE 6.10-1**

Dari kurva ini terlihat bahwa terdapat peningkatan kapasitas beban tekuk Euler setelah batang tubular penyok di-*grout*. Selain itu, nilai kapasitas beban tekuk Euler pada batang tubular tidak rusak yang diperoleh dari program Abaqus/CAE 6.10-1 juga memberikan hasil yang mendekati nilai perhitungan NORSOK STANDARD N-004. Tetapi untuk batang tubular penyok, baik tanpa *grout* maupun dengan *grout*, nilai kapasitas beban tekuk Euler yang dihasilkan dari program Abaqus/CAE 6.10-1 memberikan hasil yang berbeda dengan nilai perhitungan NORSOK STANDARD N-004. Pada Abaqus/CAE 6.10-1, peningkatan kapasitas beban tekuk Euler yang dihasilkan seragam untuk seluruh kedalaman penyok, yaitu sekitar 45%. Sedangkan hasil perhitungan pada NORSOK STANDARD N-004 menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman penyok maka semakin kecil peningkatan kapasitas beban tekuk Euler.

Perbedaan hasil analisis untuk batang tubular penyok menggunakan Abaqus/CAE 6.10-1 dan NORSOK STANDARD N-004 kemungkinan disebabkan karena pemodelan batang tubular penyok pada program Abaqus/CAE 6.10-1 masih belum sesuai dengan kondisi penyok yang sebenarnya terjadi di lapangan. Model elemen penyok yang didesain pada Abaqus/CAE 6.10-1 masih bersifat cukup masif, sehingga kapasitas beban tekuk Euler yang dihasilkan diperkirakan menjadi lebih besar dari yang seharusnya.

Perumusan pada NORSOK STANDARD N-004 tentunya sudah melalui tahapan verifikasi dengan hasil eksperimen di lapangan. Untuk itu, sebaiknya model elemen penyok pada Abaqus/CAE 6.10-1 juga dirancang menyerupai kondisi penyok yang sesungguhnya, yaitu dengan memberikan gaya lateral pada tengah bentang batang tubular hingga terbentuk penyok dengan kedalaman yang diinginkan. Lalu gaya lateral tersebut dihilangkan, dan kemudian baru dilakukan pengujian kapasitas beban tekuk yang tersisa dari batang tubular yang sudah dalam kondisi penyok tersebut.

## KESIMPULAN

Di dalam NORSOK STANDARD N-004 sudah dijabarkan formulasi untuk menghitung kapasitas beban aksial tekan karakteristik dan beban tekuk Euler dari batang tubular tidak rusak dan batang tubular penyok (tanpa dan dengan *grout*). Faktor utama yang mempengaruhi kapasitas antara batang tubular penyok satu dengan yang lain adalah nilai kedalaman penyok ( $\delta$ ). Semakin besar nilai  $\delta$  akan menurunkan kapasitas beban tekuk Euler dari suatu batang tubular penyok.

Dengan adanya *grout* pada batang tubular penyok akan memberikan peningkatan kapasitas beban aksial tekan. Hal ini sudah dibuktikan dari hasil perhitungan berdasarkan NORSOK STANDARD N-004 dan analisis pemodelan elemen hingga. Dari hasil analisis diperoleh bahwa kenaikan kapasitas aksial tekan rata-rata pada perhitungan NORSOK STANDARD N-004 yaitu 35.86% (min. 20.50% dan maks. 47.44%), dan pada perhitungan pemodelan elemen hingga yaitu 46.30% (min. 44.14% dan maks. 48.27%).

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, perhitungan berdasarkan perumusan NORSOK STANDARD N-004 dan pemodelan elemen hingga (Abaqus/CAE 6.10-1) untuk batang tubular tidak rusak memberikan hasil yang tidak berbeda jauh. Sedangkan untuk batang tubular penyok tanpa *grout* memiliki perbedaan rata-rata sebesar 21.24% (min. -1.75% dan maks 41.25%), dan untuk batang tubular penyok dengan *grout* memiliki perbedaan rata-rata sebesar 32.18% (min. -1.4% dan maks 73.8%). Perbedaan yang terjadi diperkirakan karena pemodelan yang dilakukan pada program Abaqus/CAE 6.10-1 tidak mewakili kondisi sebenarnya dari eksperimen yang telah dilakukan oleh NORSOK STANDARD N-004.

Disarankan pula adanya penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dengan mendesain kondisi penyok yang real terlebih dahulu, yaitu dengan melakukan analisis nonlinier. Dapat pula dilakukan eksperimen dengan membuat model batang tubular penyok (tanpa *grout* dan dengan *grout*) di laboratorium serta membandingkannya dengan hasil perhitungan manual berdasarkan NORSOK STANDARD N-004 dan hasil pemodelan elemen hingga. Untuk mendapatkan hasil lain yang lebih beragam dan bervariasi, dapat dicoba melakukan penelitian dengan nilai *slenderness ratio* yang berbeda-beda, atau dapat pula dengan menggunakan *software elemen hingga* yang lain seperti Ansys, Lusas, Nastran/Patran, dan lain-lain.

#### DAFTAR PUSTAKA

NORSOK STANDARD N-004. (2004). *Design of Steel Structures*. The Norwegian Oil Industry Association (OLF) and Federation of Norwegian Manufacturing Industries (TBL), Norway.

Li, L., Hu, Z., and Jiang, Z. (2013). *Plastic and Elastic Responses of a Jacket Platform Subjected to Ship Impacts*. China.

Novoselac, S., Ergić, T., Baličević, P. (2012). *Linear and Nonlinear Buckling and Post Buckling Analysis of a Bar With The Influence of Imperfections*. The Journal Tehnički vjesnik.

Predictive Engineering, Inc. (2012). *Linear and Nonlinear Buckling Analysis and Flange Crippling*. Engineering Mechanics White Paper, Portland, Oregon.

Silva, V.D. (2006). *Mechanics and Strength of Materials*. Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Portugal.

Ellinas, C.P. Walker, A.C. (1983). *Damage on Offshore Tubular Bracing Member*. Bauten, Germany.

Chen, W.F., Duan, L. (1995). *Design Equations for Cylindrical Steel Members In Offshore Structures*. Boston.