

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Pengujian Perumusan *Code API* (American Petroleum Institute) untuk *Joint Baja Tubular* tidak *DigROUT* dan *DigROUT* dengan Metoda Elemen Hingga

Made Suarjana

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia

E-mail: msuarjana@gmail.com

Mahdian Kurnia

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia

E-mail: mahdiankurnia@gmail.com

Abstrak

Offshore Platform biasanya menggunakan struktur baja tubular sebagai komponen utama penyusunnya. Kerusakan dapat terjadi pada bagian *joint tubular*, salah satu cara untuk memperbaikinya adalah dengan sistem *grouted joint*. Sistem *grouted joint* ini dianggap efektif karena biayanya yang tidak terlalu mahal dibandingkan dengan cara yang lain serta tidak mengganggu kegiatan operasional platform karena pengerjaannya tidak menghasilkan api. Perumusan mengenai kapasitas dari tubular joint (tanpa grout dan dengan grout) sudah dirumuskan di dalam API RP 2A WSD (American Petroleum Institute Recommended Practice 2A Working Stress Design) 2007. Hasil perhitungan manual berdasarkan code API ini akan dicek dan dibandingkan serta dianalisis dengan hasil dari pemodelan elemen hingga. Dari hasil analisis diperoleh kenaikan kapasitas aksial tarik rata-rata yaitu 52,75% (min. -6% dan maks. 116%). Kenaikan kapasitas aksial tekan rata-rata yaitu 343,75% (min. 230% dan maks. 468%). Kenaikan kapasitas momen lentur searah bidang rata-rata yaitu 68,88% (min. 36% dan maks. 98%). Kenaikan kapasitas momen lentur keluar bidang rata-rata yaitu 220,50% (min. 71% dan maks. 577%). Sedangkan perbedaan hasil antara perhitungan manual berdasarkan API dan pemodelan elemen hingga memiliki perbedaan rata-rata sebesar 19% (min. 2% dan maks 42%).

Kata-kata Kunci: API, *Joint tubular*, Pemodelan elemen hingga, Sistem *grouted joint*.

Abstract

Offshore platform are usually made of tubular steel as main component. Damage can occur in tubular joint, one way to restore the joint capacity is to apply grouted joint system. Grouted joint system is considered to be the most effective because the cost isn't too expensive compared to the other retrofitting and doesn't disturb the platform operations. Formulation of the capacity of the tubular joint already defined in API RP 2A WSD code (American Petroleum Institute Recommended Practice 2A Working Stress Design) 2007. Manual calculation results will be compared and analyzed with the results from finite element modeling. This research examined the amount of increase in tubular joint capacity of all the loadings. From the analysis shows that the increase in axial tension capacity of the average is 52.75% (min. -6% and max. 116%). The increase the capacity of the average axial compression is 343.75% (min. 230% and max. 468%). The increase in in-plane bending moment capacity of the average is 68.88% (min. 36% and max. 98%). The increase in out-of-plane bending moment capacity of the average is 220.50% (min. 71% and max. 577%). While the difference in results between the manual calculations based on API and finite element modeling have an average difference of 19% (min. 2% and max 42%).

Keywords: API, Finite element modeling, Grouted joint system, Tubular joint.

1. Pendahuluan

Offshore Platform sudah sangat banyak digunakan di dunia industri eksploitasi minyak dan gas bumi dengan kondisi lingkungan yang sangat bervariasi. Pada umumnya struktur *Offshore Platform* ini menggunakan struktur baja tubular sebagai komponen utama penyusunnya. Hal ini dikarenakan banyak keuntungan jika menggunakan baja tubular ini seperti beratnya

yang ringan, kekuatannya yang tinggi, kemudahan dalam pelaksanaan konstruksinya, dan bentuknya yang bulat akan meminimalisir kontak dengan gaya-gaya yang bekerja di laut (angin, arus, dan gelombang).

Pada struktur baja tubular ini terdapat *chord member* dan *bracing member*, biasanya *bracing member* di las ke permukaan *chord member* untuk membentuk suatu hubungan yang dinamakan *tubular joint*. Dalam kasus

tubular joint ini *chord member* memegang peranan sebagai kekuatan utama yang menopang *joint* ini sedangkan *bracing member* sebagai tempat beban (gaya luar) bekerja. Pada satu *joint* (sambungan) dapat terdiri dari beberapa *bracing member*, banyaknya *bracing member* yang menempel pada *joint* tersebut serta arah menempelnya *bracing* tersebut akan menentukan jenis dari suatu *joint*. Pada umumnya desain *tubular joint* mengikuti bentuk-bentuk alphabetical yang sudah umum dipakai diantaranya X, T, DT, K, Y, dan lain-lain.

Dalam kasus ini akan dikembangkan analisis dengan menggunakan *finite element method* (metoda elemen hingga) yaitu dengan menggunakan *software finite element* yaitu Abaqus/CAE 6.10. Pemilihan metoda elemen hingga ini digunakan karena lebih efisien dibandingkan dengan menggunakan metoda eksperimental, karena jika melakukan metoda eksperimental membutuhkan banyak benda uji untuk mendapatkan analisis yang diinginkan dan tentunya itu akan memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Walaupun hasil eksperimental akan memberikan hasil yang sebenarnya (*real*) dibandingkan dengan analisis elemen hingga, oleh karena itu dalam kajian ini akan dilakukan verifikasi dengan perumusan API RP 2A WSD (American Petroleum Institute Recommended Practice 2A Working Stress Design) (2007) yang berdasarkan hasil eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya.

Offshore platform dapat mengalami kerusakan akibat beban-beban yang terjadi maupun akibat kondisi lingkungan laut seperti korosi, dll. Hal ini pun dapat terjadi pada bagian *joint tubular* pada *platform* tersebut. Untuk menanggulanginya dapat dilakukan berbagai macam usaha perbaikan diantaranya pengelasan kembali, pencopotan *joint member* yang mengalami kerusakan, penggantian *joint* yang rusak dengan yang baru atau dengan cara melakukan *grouting* pada *joint* yang rusak tersebut. Cara-cara tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dalam hal ini akan dianalisa cara perbaikan dengan menerapkan sistem *grouted joint*. Cara *grouted joint* ini dianggap paling efektif karena biayanya yang tidak terlalu mahal dibandingkan dengan cara yang lain serta tidak mengganggu kegiatan operasional *platform* karena tidak menghasilkan api dalam pengerjaannya. Selain itu jika ada suatu kasus *platform existing* yang bebannya akan ditambah dan setelah dianalisis strukturnya menjadi tidak kuat, maka sistem *grouted joint* ini dapat menjadi salah satu pilihan jenis perkuatan yang dapat dilakukan.

Perbaikan dengan metoda *grouted joint* selain dapat mengembalikan kekuatan dari *joint* yang rusak tersebut, juga dapat meningkatkan kapasitasnya. Hal ini dikarenakan dengan adanya *grout* akan menambah kekakuan dari *tubular joint* tersebut sehingga otomatis kekuatan dari *joint* tersebut akan meningkat.

2. Dasar Teoretis

2.1 Grouted tubular joints

Grouted tubular joints adalah hal yang biasa dilakukan pada struktur *offshore platform existing* dan meng-*grouting joint* adalah cara yang cukup murah dan efektif untuk memperkuat struktur lama. Walaupun belum banyak *code-code offshore* yang membahas mengenai kapasitas *grouted joints*. Pada tahun 1990-an banyak petunjuk mengenai *grouted joint* berdasarkan hasil eksperimen dan *engineering approximations*. Eksperimen yang banyak dilakukan adalah mengenai *double-skin joints* yang menahan beban aksial, tetapi MSL (1997) mengeluarkan sesuatu data hasil eksperimen mengenai *fully grouted joints*, terutama yang menahan momen lentur *bracing*.

Menurut API Recommended Practice 2A-WSD (API RP 2A-WSD) (2007) ada 2 jenis *grouted joints* yaitu *fully grouted joints* dan *double-skin joints*. Sistem *fully grouted joints* diterapkan pada *joint* yang bukan terletak pada *leg* sedangkan sistem *double-skin joints* diterapkan pada *joint* yang *chord member*nya bukan *leg member*. API mensyaratkan pula minimum kekuatan *grout* adalah 41,4 MPa.

2.2 Perhitungan kapasitas tubular joints

2.2.1 Tahanan dasar

Karakteristik dari tahanan untuk *simple tubular joints* API (2007) diberikan sebagai berikut:

$$P_a = Q_u Q_f \frac{F_{yc} T^2}{FS \sin \theta} \quad (1)$$

$$M_a = Q_u Q_f \frac{F_{yc} T^2 d}{FS \sin \theta} \quad (2)$$

Keterangan:

P_a = Kapasitas desain gaya aksial pada *joint*

M_a = Kapasitas desain momen lentur pada *joint*

Q_f = Faktor aksi chord = 1

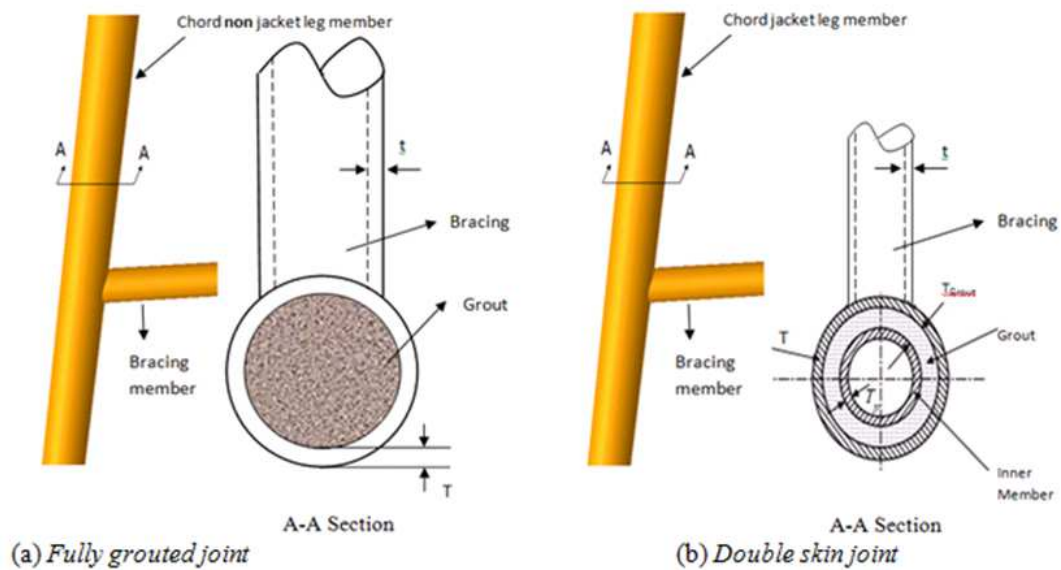
Q_u = Faktor penguatan

F_{yc} = Tegangan leleh dari *member chord* pada *joint*

FS = Safety Factor = 1.6

2.2.2 Faktor penguatan Q_u

Faktor penguatan ini bergantung pada jenis *joint* dan gaya yang bekerja pada *joint* tersebut API (2007), seperti terlihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Tipe dari *grouted tubular joints* (API, 2007)
a) *Fully grouted joint*; dan b) *Double skin joint*

Tabel 1. Nilai Q_u

Gaya yang bekerja pada joint				
Jenis Joint	Aksial Tarik	Aksial Tekan	Momen Lentur Searah Bidang	Momen Lentur Keluar Bidang
K	$(1.6 + 1.2\gamma)\beta^{1.2} Q_g \leq 40 \beta^{1.2} Q_g$		$(5+0.7\gamma) \beta^{1.2}$	$2.5+(4.5+0.2\gamma)\beta^{2.6}$
T	30β	$2.8+(20+0.8\gamma)\beta^{1.6} \leq 2.8+36\beta^{1.6}$	$(5+0.7\gamma) \beta^{1.2}$	$2.5+(4.5+0.2\gamma)\beta^{2.6}$
X	23β untuk $\beta \leq 0.9$ $20.7 + (\beta-0.9)(17\gamma-220)$ untuk $\beta > 0.9$	$[(2.8+(12+0.1\gamma)\beta)Q_\beta]$	$(5+0.7\gamma) \beta^{1.2}$	$2.5+(4.5+0.2\gamma)\beta^{2.6}$

Q_β adalah faktor geometri:

$$Q_\beta = \frac{0.3}{\beta(1 - 0.833\beta)}, \text{ untuk } \beta > 0.6 \quad (3)$$

$$Q_\beta = 1.0, \text{ untuk } \beta \leq 0.6$$

Q_g adalah faktor celah (*gap*):

$$Q_g = 1 + 0.2 \left[1 - 2.8 \frac{g}{D} \right]^3 \text{ untuk } \frac{g}{D} \geq 0.05 \text{ tetapi } \geq 1.0 \quad (4)$$

$$Q_g = 0.13 + 0.65 \phi \gamma^{0.5}, \text{ untuk } \frac{g}{D} \leq -0.05 \quad (5)$$

Jika $-0.05 \leq g/D \leq 0.05$ maka Q_g dicari menggunakan nilai interpolasi

2.2.3 Formulasi untuk *grouted joints*

Untuk *grouted joints* pada umumnya cara perhitungan kapasitasnya sama dengan *tubular joint* biasa hanya saja ada perbedaan pada nilai Q_u . Nilai Q_u untuk perhi-

tungan *grouted joints* API (2007) diberikan sesuai dengan Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Q_u untuk *grouted joints*

Gaya yang bekerja pada joint			
Jenis Joint	Aksial Tarik	Momen Lentur Searah Bidang	Momen Lentur Keluar Bidang
K	$2.5 \beta \gamma K_a$	$1.5 \beta \gamma$	$1.5 \beta \gamma$
T	$2.5 \beta \gamma K_a$	$1.5 \beta \gamma$	$1.5 \beta \gamma$
X	$2.5 \beta \gamma K_a$	$1.5 \beta \gamma$	$1.5 \beta \gamma$

$$K_a = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin \theta} \right)$$

Pada perumusan Tabel 2 tidak ada untuk kondisi aksial tekan, hal ini dikarenakan *grouted joints* sangat kuat menahan beban aksial tekan sehingga nantinya kapasitas joint dalam menahan gaya aksial tekan bergantung dari kekuatan *bracing member*.

Pada perumusan **Tabel 2** tidak ada untuk kondisi aksial tekan, hal ini dikarenakan *grouted joints* sangat kuat menahan beban aksial tekan sehingga nantinya kapasitas *joint* dalam menahan gaya aksial tekan bergantung dari kekuatan *bracing member*.

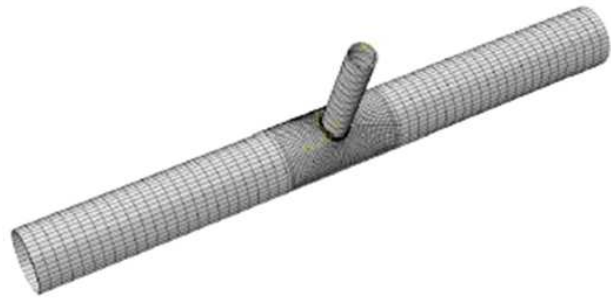
2.3 Metoda elemen hingga

Untuk membuat model elemen hingga yang tepat dan dapat diandalkan untuk menganalisis suatu model, diperlukan suatu pembagian elemen (*mesh*) yang tepat. Biasanya pembagian *mesh* ini dilakukan dalam rentang yang jauh lebih rapat di area yang akan mendapatkan tegangan yang lebih besar. Sedangkan untuk area yang tegangan nya tidak besar, dilakukan *mesh* dengan jarak yang relatif renggang untuk menghemat CPU time.

Untuk kasus tubular joint daerah yang akan mengalami tegangan yang terbesar adalah daerah perpotongan antara *brace* dan *chord*. Oleh karena itu pada daerah ini akan dipartisi (di-*mesh*) dengan sangat rapat jika dibandingkan dengan daerah yang jauh dari daerah *intersection chord* dengan *bracing*.

Untuk jenis *mesh* yang digunakan, Shubin et al (2013) menggunakan jenis C3D8I (*Hex Linear Incompatible Modes*). Menurut Shubin et al (2013), hal ini dikarenakan elemen ini mempunyai keuntungan di dalam hal menentukan masalah kontak. Sedangkan Van der Vegte et al (2002) memodelkan *tubular joint* di dalam Abaqus menggunakan elemen C3D20R (*Hex Quadratic 20 solid elements Reduced Integration*).

Elemen yang mempunyai titik (*node*) di tiap pojoknya, seperti kubus 8 titik (terlihat pada **Gambar 3a**) menggunakan interpolasi linier di setiap arah dan sering disebut sebagai elemen linier atau elemen orde satu. Elemen yang mempunyai titik derajat kebebasan di tiap



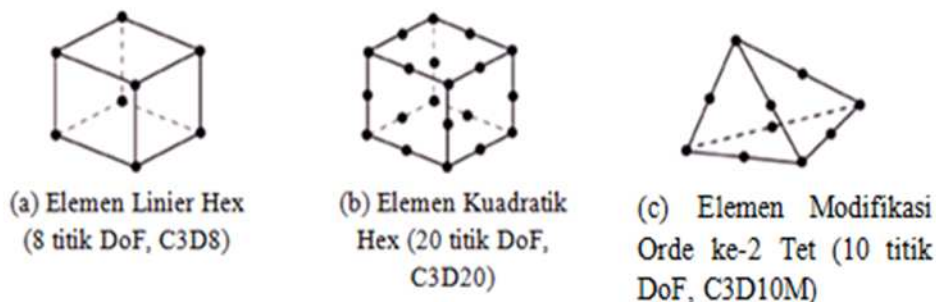
Gambar 2. Bentuk partisi (*mesh*) dari *tubular joints*

pojok dan juga di tengah-tengah setiap sisinya seperti kubus 20 titik (terlihat pada **Gambar 3b**) menggunakan interpolasi kuadrat di setiap arah dan sering disebut sebagai elemen kuadrat atau elemen orde dua. Elemen bidang empat modifikasi dengan titik (*node*) di tiap pojok dan juga di tengah-tengah setiap sisinya, seperti tetrahedron 10 titik (terlihat pada **Gambar 3c**) menggunakan interpolasi orde dua modifikasi dan sering disebut sebagai elemen orde dua modifikasi.

Sesuai dengan pembahasan di Abaqus/CAE 6.10 dijelaskan bahwa Elemen C3D8I (*Hex Linear Incompatible Modes*) adalah yang paling sesuai untuk menggambarkan kontak dan elemen ini mempunyai akurasi yang baik serta mempunyai *CPU-Time* yang lebih kecil. Sehingga dengan menggunakan elemen ini diharapkan dapat menghemat waktu pemodelan elemen hingga dan tetap mendapatkan hasil yang baik dan sesuai.

2.4 Penentuan kegagalan dan kapasitas maksimum tubular joint

Berdasarkan artikel ilmiah yang ditulis oleh D.A Pecknold et al (2001) telah dipelajari dan diteliti sebelumnya bahwa untuk menentukan kegagalan suatu



- (a) Elemen Linier Hex (8 titik DoF, C3D8)
- (b) Elemen Kuadrat Hex (20 titik Dof, C3D20)
- (c) Elemen Modifikasi Orde ke-2 Tet (10 titik DoF, C3D10M)

Gambar 3. Bentuk-bentuk Elemen Hingga a) Elemen Linier Hex; b) Elemen Kuadrat Hex; dan c) Elemen Modifikasi Kuadrat Tet

tubular joint ditetapkanlah suatu parameter pembatas. Dalam hal ini adalah suatu formulasi perpindahan (untuk gaya aksial) dan rotasi (untuk momen lentur) yang dinamakan Batas Deformasi Yura. Dengan formulasi sebagai berikut:

$$\delta = \frac{60\beta F_y D}{E} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{80F_y}{E} \quad (7)$$

Keterangan:

δ = perpindahan (*displacement*) maksimum pada *joint*

β = d/D (perbandingan diameter *bracing* dengan *chord*)

F_y = tegangan leleh baja *tubular*

E = modulus elastisitas baja *tubular*

ϕ = rotasi maksimum pada *joint*

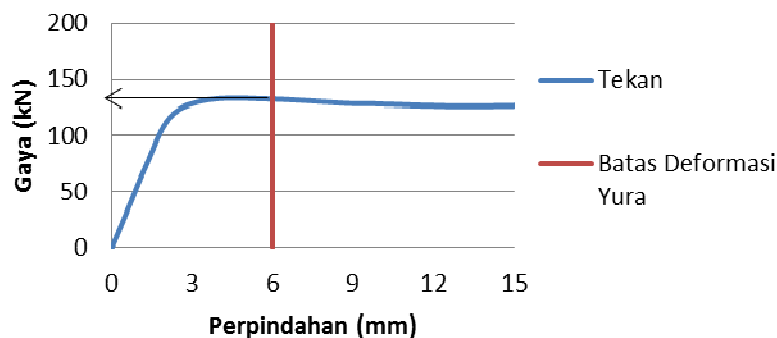
Cara untuk menentukan kapasitas maksimum dengan menggunakan persamaan Batas Deformasi Yura adalah dengan menghitung nilai δ dan ϕ pada *joint* tersebut lalu tarik titik itu pada kurva (gaya vs perpindahan atau momen vs rotasi) yang telah di plot sebelumnya.

Berikut ini adalah contoh penentuan kapasitas aksial *joint* berdasarkan kriteria kegagalan Batas Deformasi Yura:

Dalam contoh ini didapatkan $\delta = 6\text{mm}$. Lalu tarik sejajar sumbu y sampai menyentuh kurva lalu baca nilai tersebut pada sumbu y. Maka didapatkanlah kapasitas maksimum dari *joint tubular* tersebut berdasarkan Yura Displacement Limit. Jika ada nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik *fail* tersebut, maka nilai yang lebih tinggi itu adalah kapasitas maksimumnya.

3. Metode Penelitian

Dengan mempertimbangkan seluruh dasar teoretis yang telah diuraikan sebelumnya, maka akan dilakukan metoda penelitian yang akan bersifat kualitatif sesuai dengan kerangka konseptual yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Contoh penentuan kapasitas aksial tekan *joint* (kurva perpindahan vs gaya)



Gambar 5. Kerangka konseptual penelitian

4. Hipotesis

Berdasarkan dasar teoretis yang dikemukakan sebelumnya, maka dirumuskan hipotesis berikut ini: “Hasil pemodelan elemen hingga akan memberikan hasil yang tidak berbeda jauh dengan hasil perhitungan kapasitas tubular joint (tanpa grout dan dengan grout) yang didasarkan pada perumusan API. Hal ini dikarenakan perumusan pada code API berdasarkan pada hasil eksperimen dan juga metoda elemen hingga yang sebelumnya pernah dilakukan. Selain itu sistem grouted joint dapat mengembalikan atau bahkan dapat meningkatkan kapasitas dari joint tubular karena keberadaan grout akan meningkatkan kekakuan dan dapat mempertahankan bentuk joint tersebut pada saat beban bekerja.”

5. Studi Kasus

5.1 Deskripsi model studi

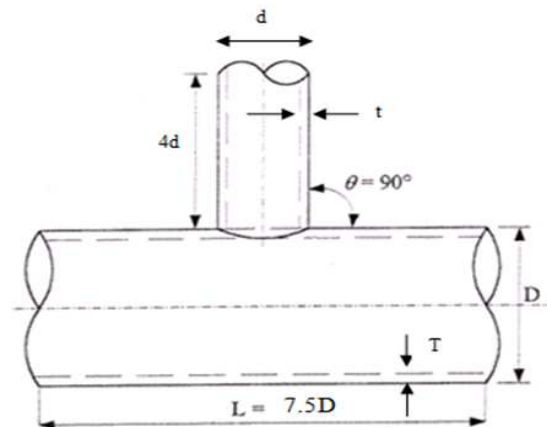
Dalam paper ini akan dimodelkan 4 variasi nilai β (d/D) dan γ ($D/2T$) dengan masing-masing terdiri dari *grouted* dan *ungrouted tubular joint* serta diberikan 4 pembebanan (aksial tekan, aksial tarik dan momen lentur searah bidang serta momen lentur keluar bidang). Hal ini bertujuan untuk melihat bagaimana hubungan nilai β dan γ terhadap kapasitas *tubular joint* (dengan *grout* dan tanpa *grout*). Dalam paper ini, jenis elemen hingga yang digunakan adalah C3D8I sama dengan jenis elemen hingga yang digunakan Shubin et al (2013). **Gambar 6** akan menunjukkan konfigurasi dari *tubular joint* yang akan dimodelkan dalam paper ini dan **Tabel 3** akan berisi rangkuman dari properti dan dimensi pemodelan yang akan diteliti dan dianalisis:

Dimensi model akan dibuat sesuai dengan konfigurasi pada **Gambar 6** hal ini dikarenakan sesuai dengan penelitian dan eksperimen yang dilakukan oleh Shubin et al (2013) dan MSL (1997).

Boundary condition yang diaplikasikan dalam pemodelan ini adalah kedua sisi *chord* diberikan tahanan sendi-roll lalu sisi-sisi yang dipotong simetris diberikan tahanan Xsymm (menahan translasi arah x dan rotasi arah y dan z).

Properti material *grout* yang digunakan memiliki kekuatan tekan sebesar 41,4 MPa sesuai dengan persyaratan minimum API. Selain itu dalam penelitian ini diasumsikan *bond* yang terjadi antara baja *tubular* dengan *grout* adalah *non-slip bonding*. Kondisi ini dianggap kondisi yang ideal yang diharapkan terjadi sedangkan jika yang terjadi adalah kondisi *slip bonding*, diperlukan penelitian lebih lanjut.

Dalam bagian 5.2 akan menampilkan contoh hasil pemodelan elemen hingga model A berupa distribusi tegangan (*stress*) yang terjadi pada *tubular joint* (tanpa *grout* dan dengan *grout*) dan bentuk dari deformasi yang terjadi pada *joint* akibat adanya perpindahan atau rotasi yang diberikan. Serta kurva hasil plot gaya vs perpindahan dan momen lentur vs rotasi untuk menentukan kapasitas dari *joint*.



Gambar 6. Konfigurasi dari *tubular joint* yang akan dimodelkan

Tabel 3. Rangkuman dimensi dan properti *tubular joint* (dengan *grout* dan tanpa *grout*) yang akan diteliti

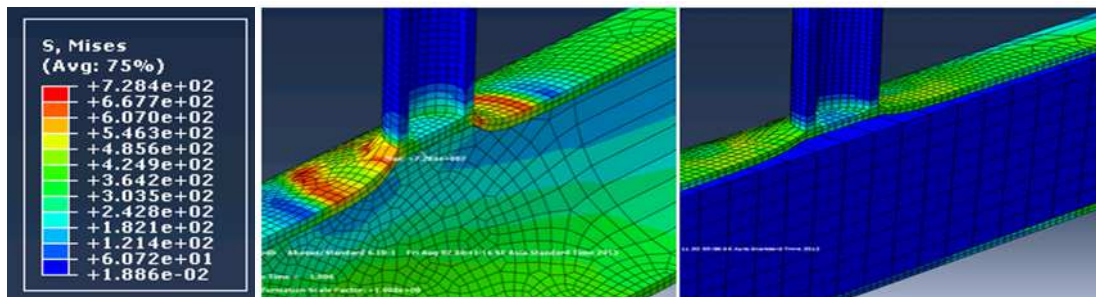
Nama Model Tubular Joint	D (mm)	d (mm)	T (mm)	t (mm)	β	γ
Model A	180	50	8	6	0,2775	11,25
Model B	180	50	5	6	0,2775	18
Model C	180	120,6	3,75	6	0,67	24
Model D	180	120,6	6	6	0,67	15

$E_{\text{baja}} = 200000 \text{ MPa}$

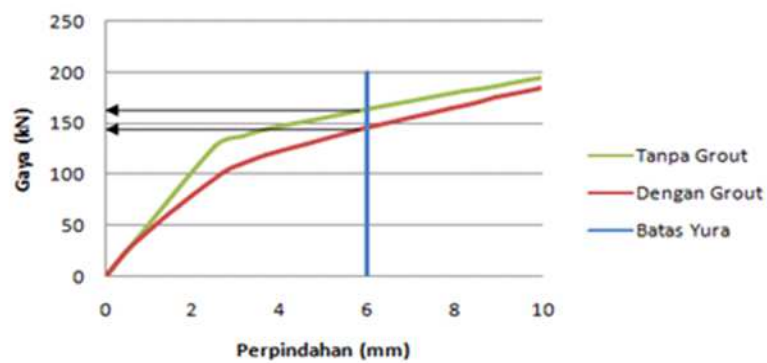
$F_y = 400 \text{ Mpa}$

5.2 Hasil pemodelan elemen hingga model A

a. Kapasitas aksial tarik

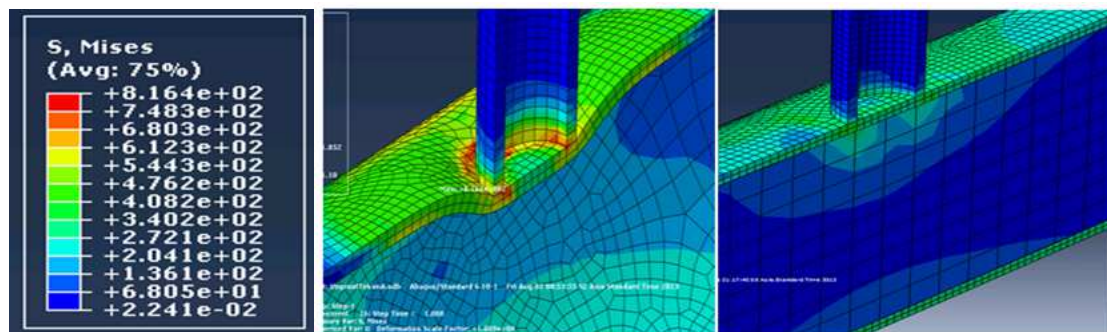


Gambar 7. Visualisasi model A tanpa *grout* dan dengan *grout* (gaya tarik)

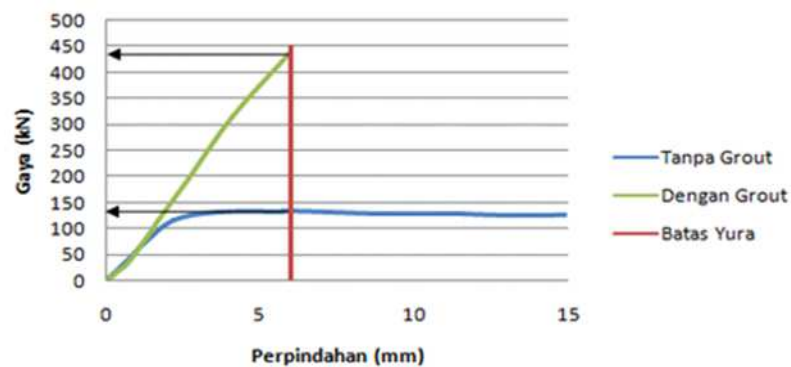


Gambar 8. Kurva gaya tarik vs perpindahan untuk model A

b. Kapasitas aksial tekan

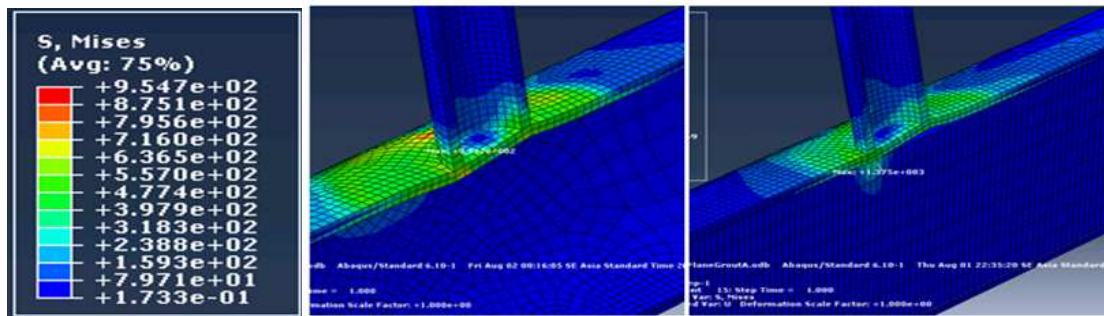


Gambar 9. Visualisasi model A tanpa *grout* dan dengan *grout* (gaya tekan)

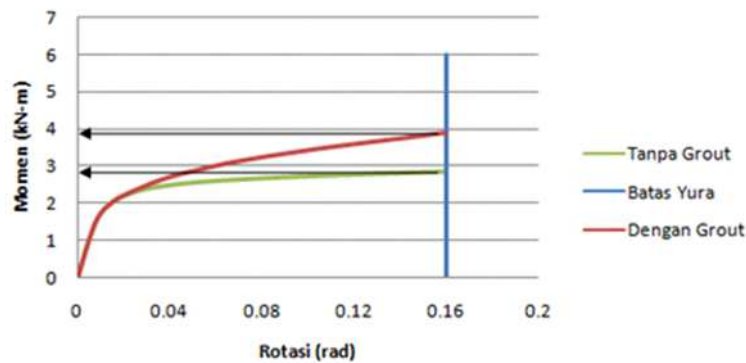


Gambar 10. Kurva gaya tekan vs perpindahan untuk model A

c. Kapasitas momen lentur searah bidang

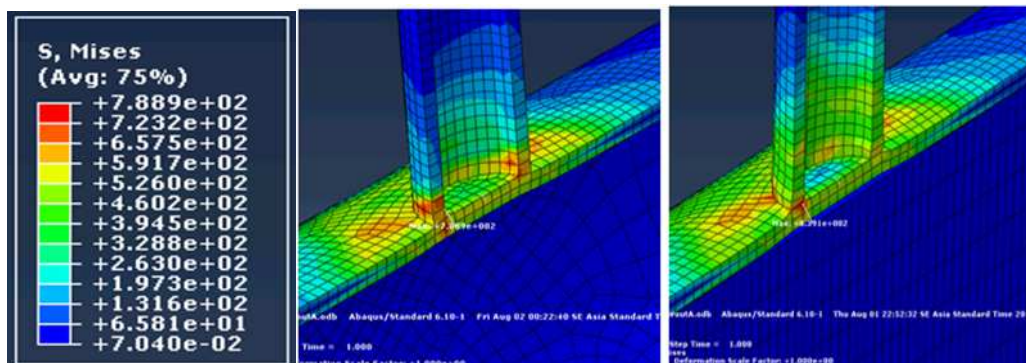


Gambar 11. Visualisasi model A tanpa *grout* dan dengan *grout* (momen lentur searah bidang)

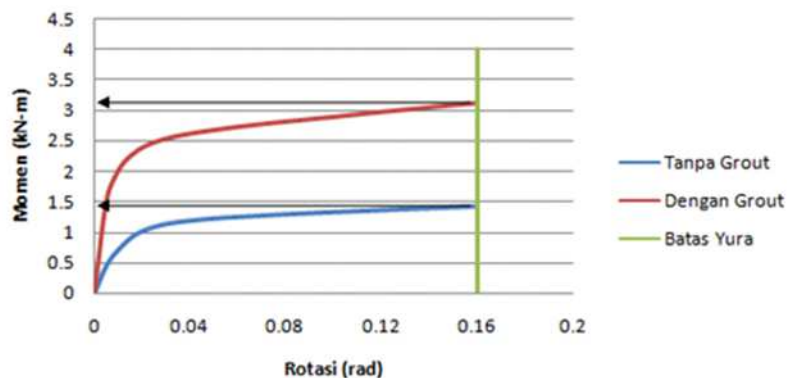


Gambar 12. Kurva momen lentur searah bidang vs rotasi untuk model A

d. Kapasitas momen lentur keluar bidang



Gambar 13. Visualisasi model A tanpa *grout* dan dengan *grout* (momen lentur keluar bidang)

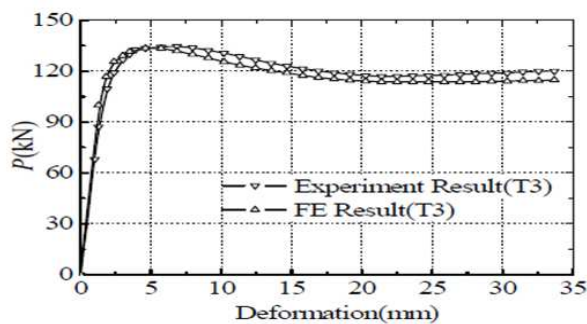


Gambar 14. Kurva momen lentur keluar bidang vs rotasi untuk model A

Terlihat dari hasil visualisasi model A (**Gambar 7, Gambar 9, Gambar 11, Gambar 13**) bahwa dengan adanya *grout* akan membuat adanya distribusi *stress* yang juga diberikan kepada *grout* tersebut sehingga kapasitas dari *tubular joint* meningkat. Sedangkan dari gambar kurva untuk semua pembebanan (**Gambar 10, Gambar 12, Gambar 14**) menunjukkan peningkatan kapasitas *tubular joint* setelah di *grout* kecuali untuk kapasitas aksial tarik (**Gambar 8**) yang mengalami sedikit penurunan. Tetapi hal ini sesuai dengan perumusan API RP 2A WSD 2007, nilai Q_u untuk kapasitas tarik *ungrout* adalah 30β sedangkan untuk *grout* $2.5\beta\gamma$, dalam kasus tertentu, di mana nilai $30\beta > 2.5\beta\gamma$ akan menyebabkan kapasitas tarik *ungrout* masih lebih besar jika dibandingkan dengan kapasitas tarik *grout*.

5.2.1 Verifikasi pemodelan model A

Khusus untuk model A, spesifikasi model ini sama seperti spesifikasi jurnal yang ditulis oleh Shubin et al (2013), hanya saja pada jurnal tersebut hanya menampilkan kurva gaya tekan vs perpindahan untuk *ungrout tubular joint*, berikut hasilnya:

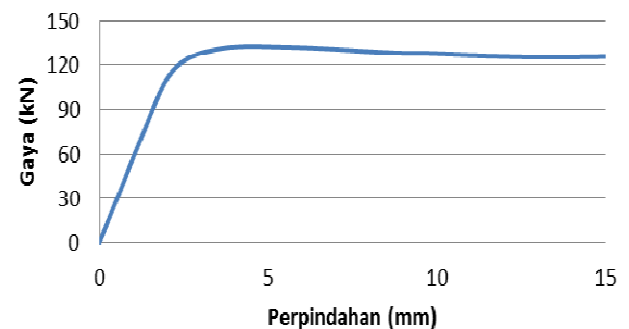


Gambar 15. Kurva perbandingan antara hasil elemen hingga model A dengan Jurnal Shubin et al (2013) (kapasitas tekan tanpa *grout*)

Pada jurnal tersebut ditulis bahwa hasil eksperimental memberikan hasil: 134,72 kN dan hasil metoda elemen hingga yang mereka lakukan memberikan hasil: 133,54 kN. Sedangkan hasil *output* elemen hingga dari model A ini memberikan hasil 132,72 kN. Hasil ini menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antara hasil yang didapatkan Shubin et al dengan model A yang diteliti, perbedaannya kurang dari 2%. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan elemen hingga yang dilakukan sudah benar.

5.3 Rangkuman hasil pemodelan dan perhitungan manual berdasarkan API

Tabel 4 s/d Tabel 7 akan menunjukkan rangkuman hasil dari keempat pemodelan *tubular joint* (tanpa *grout* dan dengan *grout*) yang telah dihitung masing-masing kapasitasnya. Baik menggunakan perhitungan manual berdasarkan API maupun dengan menggunakan hasil dari pemodelan elemen hingga dan untuk semua jenis pembebanan (aksial tekan, aksial tarik dan momen lentur searah bidang serta momen lentur keluar bidang).



Tabel 4/ Rangkuman kapasitas model A ($\beta = 0,2775$; $\gamma = 11,25$)

	Aksial Tekan (kN)	Aksial Tarik (kN)	Momen Lentur Searah Bidang (kN-m)	Momen Lentur Keluar Bidang (kN-m)	
Tanpa <i>Grout</i>	104,56	133,33	2,21	2,19	API
Dengan <i>Grout</i>	N/A	125,00	3,75	3,75	
% Kenaikan	N/A	-6%**	70%	71%	
Tanpa <i>Grout</i>	132,72	164,00	2,87	1,42	Model Elemen Hingga
	132,25*		2,79*		
Dengan <i>Grout</i>	438,00	145,00	3,91	3,12	
% Kenaikan	230%	-6%	36%	120%	Selisih API dengan Elemen Hingga
Tanpa <i>Grout</i>	21%	19%	23%	35%	
Dengan <i>Grout</i>	N/A	14%	4%	17%	

*pemodelan menggunakan elemen jenis C3D20R

**menunjukkan terjadinya penurunan kapasitas setelah di *grout*

Tabel 5. Rangkuman kapasitas model B ($\beta = 0,2775$; $\gamma = 18$)

	Aksial Tekan (kN)	Aksial Tarik (kN)	Momen Lentur Searah Bidang (kN-m)	Momen Lentur Keluar Bidang (kN-m)	
Tanpa Grout	45,19	52,08	1,18	0,87	API
Dengan Grout	N/A	78,12	2,34	2,34	
% Kenaikan	N/A	50%	98%	169%	
Tanpa Grout	66,89	62,00	1,35	0,61	Model Elemen Hingga
Dengan Grout	380,00	86,00	2,16	2,08	
% Kenaikan	468%	39%	60%	240%	
Tanpa Grout	32%	16%	13%	29%	Selisih API dengan Elemen Hingga
Dengan Grout	N/A	9%	9%	11%	

Tabel 6. Rangkuman kapasitas model C ($\beta = 0,67$; $\gamma = 24$)

	Aksial Tekan (kN)	Aksial Tarik (kN)	Momen Lentur Searah Bidang (kN-m)	Momen Lentur Keluar Bidang (kN-m)	
Tanpa Grout	76,53	70,66	5,72	2,45	API
Dengan Grout	N/A	141,33	10,23	10,23	
% Kenaikan	N/A	100%	70%	71%	
Tanpa Grout	126,60	113,00 112,98*	5,95	1,80	Model Elemen Hingga
Dengan Grout	650,00	245,00	11,37	12,20	
% Kenaikan	413%	116%	91%	577%	
Tanpa Grout	40%	37%	4%	26%	Selisih API dengan Elemen Hingga
Dengan Grout	N/A	42%	10%	19%	

*pemodelan menggunakan elemen jenis C3D20R

Tabel 7. Rangkuman kapasitas model D ($\beta = 0,67$; $\gamma = 15$)

	Aksial Tekan (kN)	Aksial Tarik (kN)	Momen Lentur Searah Bidang (kN-m)	Momen Lentur Keluar Bidang (kN-m)	
Tanpa Grout	176,94	180,87	10,41	5,59	API
Dengan Grout	N/A	226,12	16,36	16,36	
% Kenaikan	N/A	25%	57%	193%	
Tanpa Grout	191,00	184,00	11,05	3,51 4,18*	Model Elemen Hingga
Dengan Grout	695,00	376,00	18,70	14,86	
% Kenaikan	264%	104%	69%	323%	
Tanpa Grout	7%	2%	6%	37%	Selisih API dengan Elemen Hingga
Dengan Grout	N/A	40%	13%	9%	

*pemodelan menggunakan elemen jenis C3D20R

6. Kesimpulan

1. Dengan adanya grout pada joint tubular akan memberikan peningkatan kapasitas untuk semua jenis pembebanan (aksial tekan, aksial tarik dan momen lentur searah bidang serta momen lentur keluar bidang). Hal ini sudah dibuktikan dari hasil analisa pemodelan elemen hingga dan perhitungan manual berdasarkan API RP 2A WSD 2007. Kecuali kapasitas tarik pada joint dengan dimensi tertentu. Hal ini sesuai dengan perumusan API RP 2A WSD 2007, nilai Q_u untuk kapasitas tarik ungrout adalah 30β sedangkan untuk grout $2.5\beta\gamma$, dalam kasus tertentu, di mana nilai $30\beta > 2.5\beta\gamma$ akan menyebabkan kapasitas tarik ungrout masih lebih besar jika dibandingkan dengan kapasitas tarik grout.

Berdasarkan **Tabel 4** s/d **Tabel 7** dapat disimpulkan pula peningkatan kapasitas akibat adanya *grout*:

- a. Peningkatan kapasitas tarik rata-rata: 52,75% (min. -6% dan maks. 116%).
 - b. Peningkatan kapasitas tekan rata-rata: 343,75% (min. 230% dan maks. 468%).
 - c. Peningkatan kapasitas momen lentur searah bidang rata-rata: 68,88% (min. 36% dan maks. 98%).
 - d. Peningkatan kapasitas momen lentur keluar bidang rata-rata: 220,50% (min. 71% dan maks. 577%).
2. Dari hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan diperoleh perbedaan antara perhitungan manual berdasarkan code API RP 2A WSD 2007 dengan hasil pemodelan elemen hingga memberikan hasil yang pada umumnya tidak berbeda jauh, maksimum 42% (hanya ada 1 data) dan minimum 2% sedangkan rata-rata perbedaan sebesar 19%.
 3. Untuk parameter kekuatan tubular joint yaitu γ ($D/2T$), makin kecil nilai γ akan meningkatkan kapasitas dari tubular joint tersebut untuk semua jenis pembebanan (hal ini berlaku untuk kondisi tanpa grout maupun dengan grout). Hal ini dikarenakan makin kecil γ akan meningkatkan kekakuan radial (radial stiffness) sehingga kekuatan joint akan meningkat.
 4. Untuk parameter kekuatan tubular joint yaitu β (d/D), makin besar nilai β akan meningkatkan kapasitas dari tubular joint tersebut untuk semua jenis pembebanan (hal ini berlaku untuk kondisi tanpa grout maupun dengan grout). Hal ini dikarenakan makin besar β mengindikasikan ukuran brace member yang semakin besar yang sehingga gaya yang diterima dapat semakin besar juga sehingga otomatis kapasitas joint akan meningkat.

5. Dalam paper ini, diambil beberapa contoh kasus joint tubular tanpa grout yang dimodelkan menggunakan jenis elemen hingga C3D20R untuk kasus kapasitas tekan A, kapasitas tarik C, kapasitas momen lentur searah bidang A, dan kapasitas momen lentur keluar bidang D. Ternyata diperoleh hasil yang mendekati dengan analisis menggunakan elemen C3D8I. Perbedaan terbesar terjadi pada kapasitas momen lentur keluar bidang D yaitu 14% sedangkan perbedaan terkecil terjadi pada kapasitas tekan A yaitu 0,3%.

Singkatan

API	<i>American Petroleum Institute</i>
API RP 2A WSD	<i>American Petroleum Institute Recommended Practice 2A Working Stress Design</i>
CAE	<i>Computer-aided Engineering</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
MSL	<i>Master Science Laboratory</i>

Lambang

D	Diameter <i>chord member</i>
d	Diameter <i>bracing member</i>
E	Modulus elastisitas baja <i>tubular</i>
F_y	Tegangan leleh pada baja <i>tubular</i>
F_{yc}	Tegangan leleh <i>chord member</i> pada <i>joint</i>
FS	<i>Safety factor</i>
g	<i>Gap</i> (celah)
K_a	Faktor sudut <i>joint</i>
M_a	Kapasitas desain momen lentur pada <i>joint</i>
P_a	Kapasitas desain gaya aksial pada <i>joint</i>
Q_g	Faktor celah
Q_β	Faktor geometri
Q_f	Faktor aksi <i>chord</i>
Q_u	Faktor penguatan
T	Ketebalan <i>chord member</i>
t	Ketebalan <i>bracing member</i>
β	Perbandingan diameter <i>chord member</i> dengan <i>bracing member</i>
γ	Perbandingan diameter <i>chord member</i> dengan tebal <i>chord member</i>
δ	Perpindahan (<i>displacement</i>) maksimum pada <i>joint</i>
ϕ	Rotasi maksimum pada <i>joint</i>
θ	Sudut antara <i>chord member</i> dengan <i>bracing member</i>

Daftar Pustaka

- API Recommended Practice 2A-WSD (API RP 2A-WSD), 2007, *Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platform*, American Petroleum Institute.
- MSL Engineering Limited., 1997, *Development of Grouted Tubular Joint Technology for Offshore Strengthening and Repair-Phase 1 Report*, Ascot, England: Doc. Ref. C14100R020, Rev 2.
- Pecknold, D.A., Park, J.B., and Koppenhoefer, K.C., 2001, Ultimate Strength of Gap K Tubular Joints with Chord Preloads, Rio de Janeiro, Brazil: *Proceedings of OMAE'01 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- Shubin, H.E., Yongbo, S., and Hongyan, Z., 2013, Static Strength of Circular Tubular T-joints with Inner Doubler Plate Reinforcement Subjected to Axial Compression, *The Open Ocean Engineering Journal*.
- Van der Vegte, G.J., Makino, Y., and Wardeiner, J., 2002, The Effect of Chord Pre-load on The Static Strength of Uniplanar Tubular K-Joints, Kitakyushu, Jepang; *Proceedings of The Twelfth Offshore and Polar Engineering Conference*.