

PERHITUNGAN SCF UNTUK ANALISA FATIGUE PADA SAMBUNGAN STRUKTUR ANJUNGAN LEPAS PANTAI

Ricky L. Tawekal¹

ABSTRACT

Fatigue is one of the failure modes on offshore structures that need to be monitored carefully. Fatigue analysis is usually carried out to predict the service life of structure due to fatigue on its joints. Fatigue damage is also depend on Stress Concentration Factor (SCF). SCF is the ratio of hotspot stress at joint to nominal stress on member. Hotspot stress is extreme stress occur at intersection of the joint.

In this paper, the calculation of SCF at joint T is carried out by using Finite Element Method that available in ProEngineer Software. The resulted SCF based on Finite Element Method will be compared to calculated SCF based on empirical formula. In addition, SCF on joint T will also be compared to SCF on joint with tubular stiffener.

Keywords : *fatigue, failure mode, offshore structures, stress concentration factor*

PENDAHULUAN

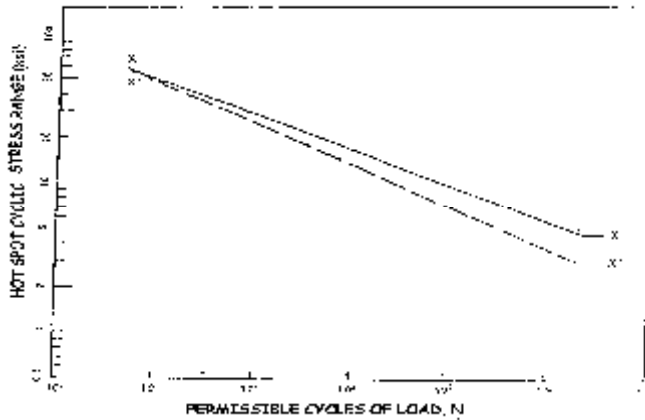
Proses perancangan struktur bangunan lepas pantai merupakan proses rumit yang harus mempertimbangkan banyak faktor. Hal itu harus dilakukan untuk menjamin struktur tersebut mampu memenuhi fungsinya dan dapat bertahan sesuai umur layan yang diinginkan di tengah kondisi lingkungan yang lebih ganas dibandingkan di darat. Kriteria desain untuk tiap jenis struktur berbeda-beda, selain itu, kriteria dominan yang ada di suatu kawasan menentukan jenis struktur yang akan dipilih. Yang paling penting untuk diperhatikan adalah bahwa struktur yang akan dibangun harus mampu menahan moda keruntuhan yang mungkin terjadi akibat keadaan lingkungan. Beberapa moda keruntuhan

bangunan lepas pantai yang umum terjadi antara lain korosi, penggetasan (*brittle*), *fatigue* ataupun gabungannya.

Fatigue atau kelelahan struktur akibat beban berulang merupakan salah satu moda keruntuhan bangunan lepas pantai yang harus diwaspadai. Apalagi bila pada struktur banyak terdapat sambungan tubular dengan las yang dapat menimbulkan tegangan *hotspot* yaitu tegangan maksimum pada intersection yang dapat memacu percepatan timbulnya kelelahan pada struktur.

Contoh sambungan tubular dengan K-bracing pada platform dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini :

¹ Pengajar Program Studi Teknik Kelautan –
Departemen Teknik Sipil ITB



Gambar 2. Kurva S-N (API RP2A)

Berdasarkan standard API RP2A (kriteria desainanjungan lepas pantai yang dikeluarkan API), jumlah siklus gaya gelombang yang mengakibatkan keruntuhan pada range tegangan tertentu (Ni) diberikan oleh kurva S-N di atas dengan persamaan sebagai berikut :

$$N_i = c \cdot (\Delta\sigma_H / \Delta\sigma_{ref})^{-m} \dots\dots\dots (1)$$

dimana :
 m adalah kemiringan kurva S-N yang dipakai. Yaitu :
 m = 4,38 dengan $\Delta\sigma_{ref} = 14.5$ ksi untuk kurva X untuk joint dengan kontrol profil dan sambungan halus. (lihat kurva S-N API)
 m = 3,74 dengan $\Delta\sigma_{ref} = 11.4$ ksi untuk kurva X' untuk joint tanpa kontrol profil.
 c = 2.10^6

Sambungan tubular yang dikenai beban akan menimbulkan tegangan maksimum (berupa tegangan *hot-spot*) pada sambungannya (*intersersection*). Bagian sambungan itulah yang paling rawan akan keruntuhan baik *brittle* maupun *fatigue*. Perbandingan antara tegangan maksimum pada sambungan dengan tegangan nominal disebut *Stress Concentration Factor (SCF)*.

Nilai SCF inilah yang merupakan salah satu komponen penting dalam penghitungan *fatigue damage*. SCF diperlukan karena tegangan yang terjadi pada sambungan tubular tidak menyebar secara merata.

Kejadian moda keruntuhan fatigue dapat diuraikan menjadi 3 bagian yaitu retakan awal (*initial crack*), penyebaran retakan (*crack spreading*) yang bila semakin besar pada batas tertentu akan terjadi keruntuhan struktur (*fracture*).

Initial crack adalah retakan (mikro) yang menjadi awal mula terjadinya keruntuhan. Retakan awal ini biasanya terjadi di lokasi dimana tegangan hot-spot mencapai titik maksimum. Dalam sambungan tubular biasanya terjadi pada lokasi pengelasan. Disinilah *Stress Concentration Factor (SCF)* terjadi. SCF ini akan memperbesar tegangan yang terjadi yang berakibat semakin besar pula *fatigue damage* sambungan. Semakin besar *fatigue damage*, semakin pendek *fatigue life* sambungan.

Setelah *initial crack* mencapai batas tertentu, maka retakan mulai menyebar ke sekitarnya. Bila hal ini tidak segera diperbaiki maka struktur itu akan mengalami keruntuhan.

Perhitungan SCF untuk Analisa Fatigue
pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai

Beberapa tes pada data-data keruntuhan akibat fatigue mengindikasikan banyak faktor yang mempengaruhi kekuatan struktur dalam menahan fatigue (fatigue strength). Beberapa faktor tersebut antara lain:

- a. Faktor Material
 - parameter mekanis
 - finishing permukaan
 - tegangan sisa (residual stress)
- b. Faktor Desain
 - geometri dan ukuran sambungan
 - rate pembebanan
 - tegangan maksimum
 - SCF (perbandingan tegangan hot-spot dan tegangan nominal)
- c. Faktor Fabrikasi
 - teknik pengelasan (semakin modern dan bagus kualitas pengelasan, makin sedikit diskontinuitas bahan)

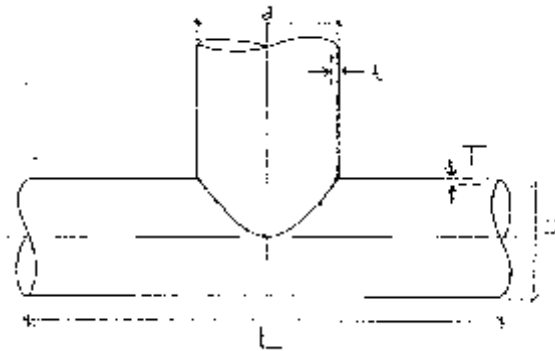
- pengerjaan di shop (ada atau tidak treatment khusus yang bisa mempengaruhi sifat bahan)

PARAMETER GEOMETRI SAMBUNGAN TUBULAR

Sudah banyak persamaan atau formula untuk mendapatkan nilai SCF yang dikembangkan secara empiris. Persamaan-persamaan tersebut mendasarkan perhitungan SCF dari parameter-parameter geometri sambungan tubular.

Parameter-parameter yang dimaksud adalah:

- D = diameter luar dari chord ($= 2R$)
- d = diameter luar dari brace ($= 2r$)
- T = ketebalan chord
- t = ketebalan brace
- L = panjang chord

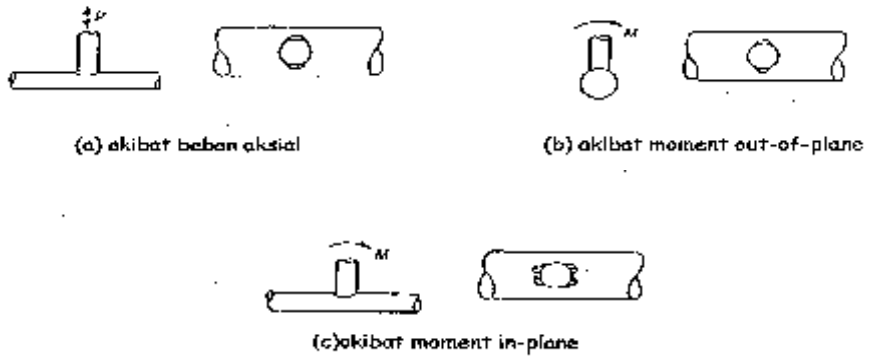


Gambar 3. Sambungan T sederhana

Selain itu ada juga parameter parameter lain yang didapatkan dari parameter-parameter di atas yaitu:

$$\begin{aligned}\beta &= d/D \\ \alpha &= 2L/D \\ \gamma &= D/2T \\ \tau &= t/T \\ \zeta &= g/D\end{aligned}$$

Dari berbagai penelitian dan studi atas berbagai parameter itu tercipta beberapa persamaan empiris yang mencoba mendekati nilai SCF dari suatu sambungan tubular. SCF yang terjadi pada sambungan dapat diakibatkan beban aksial, momen in-plane maupun momen out-plane.



Gambar 4. Jenis-jenis gaya dan momen yang bekerja pada sambungan

Persamaan Empiris J.G. Kuang

Khusus untuk sambungan tipe T, Kuang merumuskan persamaan SCF akibat tiga gaya (beban) yang bekerja pada sambungan yaitu beban aksial, beban moment in-plane dan beban moment out-plane.

- SCF akibat beban *axial*:

$$SCF \text{ Chord} = 1.177 \frac{(t/T)^{1.333} (\sin \theta)^{1.694}}{(T/D)^{0.808} e^{1.2(d/D)} (D/L)^{0.057}} \dots (2)$$

$$SCF \text{ Brace} = 2.784 \frac{(t/T)(\sin \theta)^{1.94}}{(T/D)^{0.55} e^{1.35(d/D)} (D/L)^{0.12}} \dots (3)$$

- SCF akibat momen *in-plane*:

$$SCF \text{ Chord} = 0.463 \frac{(t/T)^{0.86} (\sin \theta)^{0.57}}{(T/D)^{0.6} (d/D)^{0.04}} \dots (4)$$

$$SCF \text{ Brace} = 1.109 \frac{(\sin \theta)^{0.2}}{(T/D)^{0.23} (d/D)^{0.38} (t/T)^{0.38}} \dots (5)$$

- SCF akibat beban momen *out-plane*:

$$SCF \text{ Chord} = 0.229 \frac{(t/T)^{0.889} (\sin \theta)^{1.557}}{(T/D)^{1.104} (d/L)^{0.619}} \dots (6)$$

$$SCF \text{ Brace} = 0.441 \frac{(t/T)^{0.542} (\sin \theta)^{2.033}}{(T/D)^{0.852} (d/D)^{0.281}} \dots (7)$$

Persamaan Empiris Gibstein

Persamaan Empiris Gibstein merupakan pengembangan persamaan Kuang. Sama seperti juga Kuang, Gibstein membedakan harga SCF untuk chord dan brace. Range validitas persamaan Gibstein adalah sebagai berikut :

Untuk chord :

$$\begin{aligned} 7 &\leq \alpha \leq 16 \\ 0.225 &\leq \beta \leq 0.9 \\ 10 &\leq \gamma \leq 30 \\ 0 &\leq \tau \leq 1 \end{aligned}$$

Untuk brace :

$$\begin{aligned} 7 &\leq \alpha \leq 16 \\ 0.3 &\leq \beta \leq 0.9 \\ 10 &\leq \gamma \leq 30 \\ 0.47 &\leq \tau \leq 1 \end{aligned}$$

- SCF akibat beban *axial*:

$$SCF \text{ Chord} = \alpha^{0.06} [1.44 - 3.72(\beta - 0.42)^2] \gamma^{0.87} \tau^{1.05} \dots (8)$$

$$SCF \text{ Brace} = \alpha^{0.12} [1 - 1.78(\beta - 0.5)^2] \gamma^{0.76} \tau^{0.57} \dots (9)$$

- SCF akibat beban momen *in-plane*:

$$SCF \text{ Chord} = [1.65 - 1.1(\beta - 0.42)^2] \gamma^{0.38} \tau^{1.05} \dots (10)$$

$$SCF \text{ Brace} = [0.95 - 0.65(\beta - 0.41)^2] \gamma^{0.39} \tau^{0.29} \dots (11)$$

- SCF akibat beban momen *out-plane* :

$$\text{SCF Chord} = [1.01 - 3.36(\beta - 0.64)^2] \gamma^{0.95} \tau^{1.18} \dots (12)$$

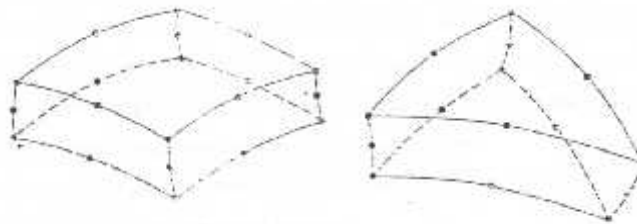
$$\text{SCF Brace} = [0.76 - 1.92(\beta - 0.72)^2] \gamma^{0.89} \tau^{0.47} \dots (13)$$

Persamaan Empiris Visser

Berbeda dari kedua persamaan empiris sebelumnya, persamaan Visser mengabaikan perbedaan letak tegangan hot-spot pada chord dan brace. Persamaan empiris Visser berlaku untuk kedua daerah baik chord maupun brace.

Persamaan empiris Visser adalah sebagai berikut:

$$\text{SCF} = \tau (10 + 0.3 \gamma) (1.4 - 0.75 \beta) \dots (14) \quad (7)$$



Gambar 5. Elemen Lengkung Heksahedron dan Pentahedron

Elemen ini mempunyai 3 derajat kebebasan translasi dan 3 derajat kebebasan rotasi pada masing-masing titik nodalnya, yaitu arah x, y dan z.

Dalam makalah ini, elemen yang digunakan adalah *thin shell element* yang dianggap sangat tipis dan memiliki empat titik nodal. Hasil analisis statis yang diperoleh salah satunya adalah tegangan pada tiap titik nodal. Untuk perhitungan SCF, digunakan tegangan von Mises pada analisis post-processing.

Berbeda dengan beberapa program element hingga yang lain, di dalam software ProEngineer telah ada DataGenerator yang otomatis mentransfer semua masukan geometris yang kita buat dalam model

PEMODELAN DAN ANALISA ELEMEN HINGGA SAMBUNGAN TUBULAR

Shell Element digunakan dalam desain dan analisa sambungan tubular dengan bantuan software ProEngineer 2001. Shell elemen berbentuk lengkung. Elemen lengkung yang digunakan untuk analisa dapat dibentuk dari elemen pejal tertentu yang tipis dengan kondisi batas pada tiap peralihan nodal. Kita dapat membuat shell element segitiga dan kuadrilateral yang melengkung pada ruang tiga dimensi dengan menggunakan elemen heksahedron dan pentahedron.

menjadi data yang siap untuk dianalisis. Artinya, kita tinggal membuat geometri struktur yang ingin kita analisis secara detail lalu komputer akan otomatis meng-*generate* semua data yang dibutuhkan untuk analisis. Apalagi dengan tampilan ikonik dan berbagai fungsi proyeksi dan pemotongan, membuat pekerjaan pemodelan pada ProEngineer menjadi lebih mudah.

Sesudah model terbentuk, selanjutnya didefinisikan pembebanan (load), syarat batas (constraints) dan tipe material.

- pembebanan terdiri dari beban *axial*, momen *in-plane* dan momen *out-plane*
- *constraints* pada ujung-ujung chord adalah jepit (*fixed-end*)
- tipe material adalah baja (*steel*)

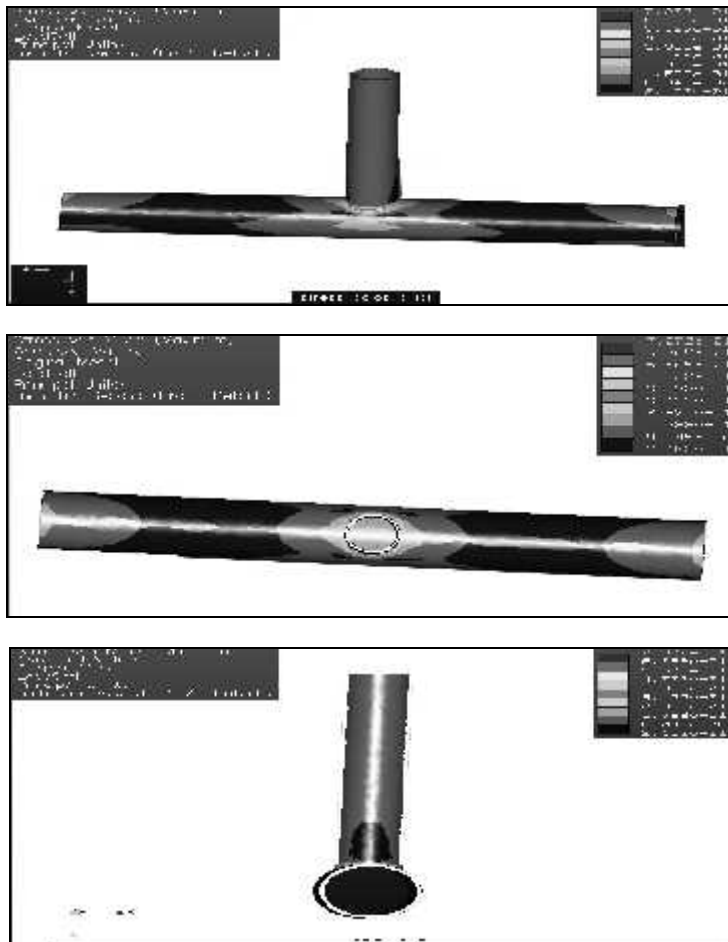
Sesudah pembuatan model baik sambungan polos maupun dengan memakai penguat, dilakukan analisis dengan software ProMechanica yang telah diintegrasikan ke dalam software ProEngineer. Diskritisasi dilakukan dengan grid pembagian elemen kurang-lebih 3000 buah. Analisis yang dilakukan adalah statis linear dengan memakai tegangan Von Mises.

Tegangan Akibat Beban Axial

Untuk sambungan T polos tanpa penguat, perbandingan SCF pada sambungan dengan pembebanan axial antara penghitungan memakai software dan manual adalah sebagai berikut :

Untuk gaya axial SCF yang dihasilkan dari program adalah 4.47 sedangkan hasil perhitungan manual dengan rumus empiris Kuang adalah 5.032.

Kontur tegangan akibat beban axial hasil analisis ProEngineer adalah sebagai berikut:



Gambar 6. Kontur Tegangan Sambungan Polos Akibat Beban Axial

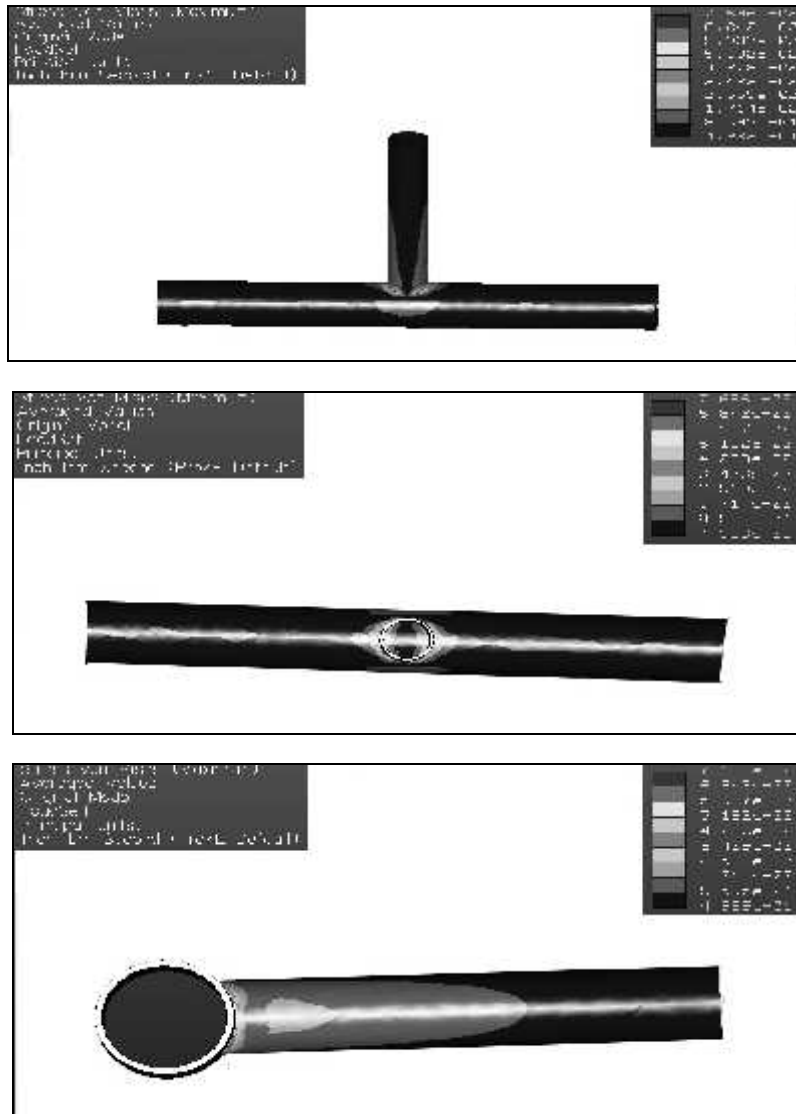
Perhitungan SCF untuk Analisa Fatigue
pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai

Tegangan Akibat Beban Momen In-plane

Untuk gaya momen in-plane, SCF yang dihasilkan dari program adalah 2.98.

Sedangkan hasil perhitungan manual dengan rumus empiris Kuang adalah 3.01.

Kontur tegangan akibat beban momen in-plane hasil analisis ProEngineer adalah sebagai berikut :



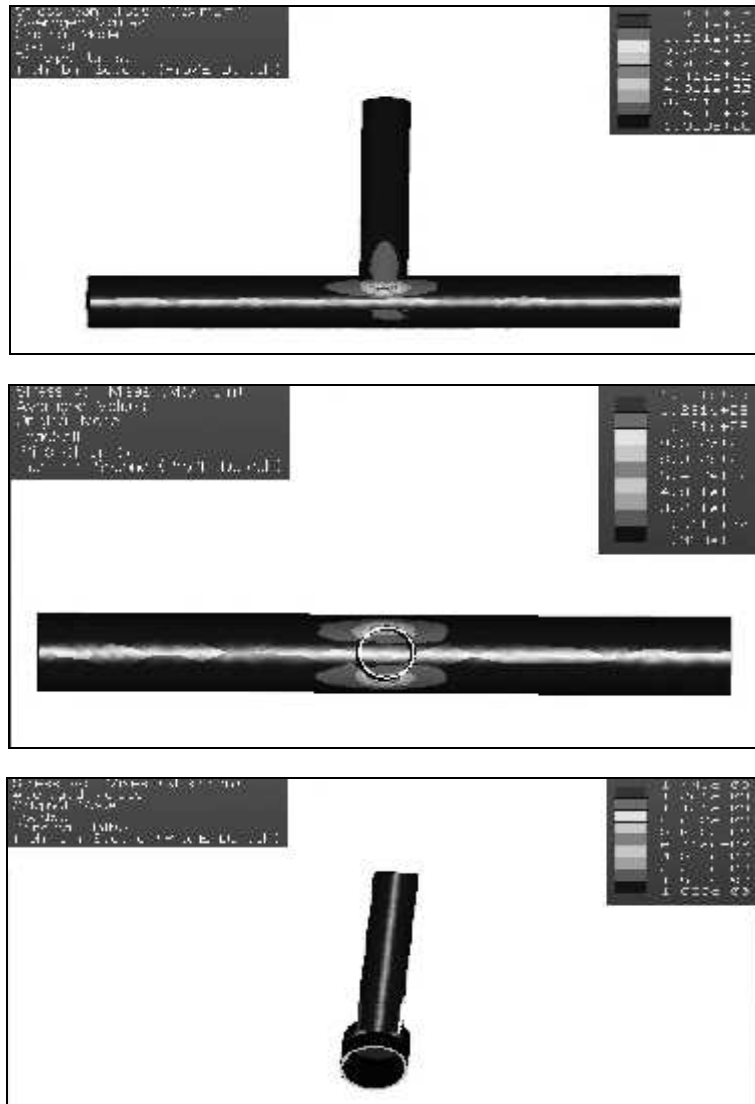
Gambar 7. Kontur Tegangan Sambunga Polos Akibat Beban Momen In-plane

Tegangan Akibat Beban Momen Out-plane

Untuk gaya momen out-plane, SCF yang dihasilkan dari program adalah 4.488.

Sedangkan hasil perhitungan manual dengan rumus empiris Kuang adalah 5.098.

Kontur tegangan akibat beban momen out-plane hasil analisis ProEngineer adalah sebagai berikut :



Gambar 7. Kontur Tegangan Sambung Polos Akibat Momen Out-plane

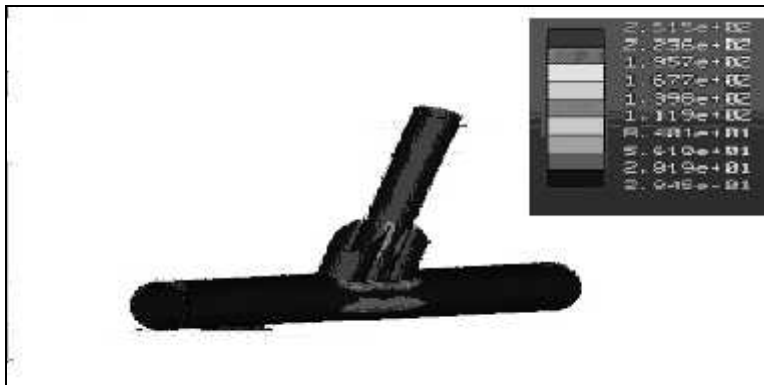
PERBANDINGAN SAMBUNGAN POLOS TERHADAP SAMBUNGAN DENGAN PENGUAT TUBULAR

Pembebanan Axial

Sama seperti penambahan penguat jenis *gusset-plate*, penambahan penguat tubular pada titik sambungan juga mengubah nilai SCF sambungan tipe T, tetapi dengan nilai

yang berbeda. Pada sambungan polos (tanpa penguat) nilai SCF yang diperoleh adalah 4.47. Sedangkan sambungan yang memakai penguat tubular menghasilkan SCF sebesar 2.98.

Berikut ini kontur tegangan akibat pembebanan axial pada sambungan yang diberi penguat tubular:



Gambar 8. Kontur tegangan sambungan dengan penguat tubular akibat beban axial

Pembebanan Momen In-plane

Pada sambungan polos (tanpa penguat) nilai SCF yang diperoleh pada software ProEngineer adalah 2.98 . Sedangkan

sambungan yang memakai penguat tubular menghasilkan SCF sebesar 2.15.

Berikut ini kontur tegangan akibat pembebanan momen in-plane pada sambungan yang diberi penguat tubular :



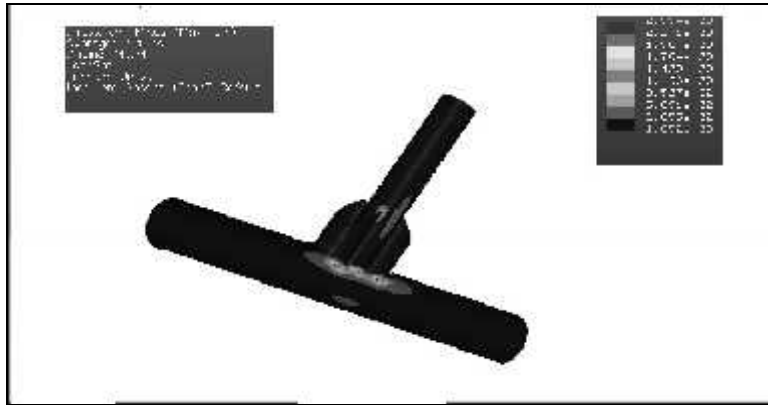
Gambar 9. Kontur tegangan sambungan dengan penguat tubular akibat beban momen in-plane

Pembebanan Momen Out-plane

Pada sambungan polos (tanpa penguat) nilai SCF yang diperoleh adalah 4.488. Sedangkan sambungan yang memakai

penguat tubular menghasilkan SCF sebesar 2.99.

Berikut ini kontur tegangan akibat pembebanan axial pada sambungan yang diberi penguat tubular:



Gambar 10. Kontur tegangan sambungan dengan penguat tubular akibat beban momen out-plane

KESIMPULAN

Secara singkat, perbandingan hasil analisis untuk tiap-tiap kasus sambungan disajikan dalam table berikut ini :

Tabel 1. Perbandingan SCF Hasil Analisis

| Jenis Sambungan | Metode Perhitungan | SCF AXIAL | SCF IN-PLANE | SCF OUT-PLANE |
|-----------------|--------------------|-----------|--------------|---------------|
| POLOS | MANUAL (KUANG) | 5.032 | 3.01 | 5.098 |
| POLOS | PRO-ENG | 4.47 | 2.98 | 4.488 |
| PENGUAT TUBULAR | PRO-ENG | 2.98 | 2.15 | 2.99 |

Sekilas dapat dilihat bahwa pemakaian penguat dapat mengurangi nilai SCF dari join, yang pada gilirannya dapat mengurangi fatigue-damage dan meningkatkan fatigue-life sambungan. Namun pengujian ini masih jauh dari

mencukupi karena hanya diuji pada satu model sambungan dengan satu set geometri sambungan. Untuk pengujian yang lebih akurat bisa disertakan lebih banyak ukuran sambungan dengan variasi pembebanan yang lebih banyak pula.

Perhitungan SCF untuk Analisa Fatigue
pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai

DAFTAR PUSTAKA

Proceeding ImechE; *Fatigue and Crack Growth in Offshore Structure*; Mech.Eng.Publications Limited; London, 1986

W.J. Graff; *Introduction to Offshore Structure*; Gulf Publishing Company; 1981

Hendro Yulianto & Ossi Ferli; *Desain Anjungan Lepas Pantai Tipe Braced*

Monopod; Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung; 2003

Yudhi Azfandiari; *Analisa fatigue Sambungan T PPada Platform Tipe Braced Monopod*; Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, 2003

American Petroleum Institute; *API Recommended Practice 2A*; Twenty First Edition; December 2000