

## SIMULASI NUMERIK *HOT-SPOT STRESS* DAN *STRESS CONCENTRATION FACTOR* PADA SAMBUNGAN TUBULAR SEDERHANA T, Y, K, DAN X

Nurman Pamungkas<sup>1\*</sup>, Suheri<sup>2</sup>, dan Nur Fitria Pujo Leksonowati<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Perencanaan dan Konstruksi Kapal, Politeknik Negeri Batam

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Samudra

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

\*Corresponding author: nurman@polibatam.ac.id

### Article history

**Received:**

26-06-2021

**Accepted:**

28-06-2021

**Published:**

30-06-2021

Copyright © 2021  
Jurnal Teknologi dan  
Riset Terapan

Open Access

### Abstrak

Pada struktur bangunan lepas pantai sambungan tubular jamak sekali digunakan. Sambungan tubular yang difabrikasi dengan proses pengelasan seringkali menimbulkan *hot-spot stress* (HSS) yang tinggi. Tingginya nilai HSS dan *Stress Concentration Factor* (SCF) pada sambungan tubular akan mengurangi umur pakai bangunan lepas pantai akibat beban *fatigue*. Pada studi ini sambungan tubular sederhana T, Y, K, dan X digunakan untuk mendapatkan HSS dan SCF melalui simulasi FEM. Letak HSS maksimum pada pembebanan aksial (FA) bervariasi disekitar *crown* awal, pada pembebanan *In-Plane Bending* (IPB) berada setelah *crown* kedua, sedangkan pada pembebanan *Out-of-Plane Bending* (OPB) berada di sekitar *saddle* kedua. Secara umum nilai SCF pada ketiga model pembebanan hasil simulasi FEM lebih rendah dari perhitungan formula SCF penelitian sebelumnya, hasil ini selaras dengan hasil studi review SCF yang lebih baru.

**Kata Kunci:** *Hot Spot Stress, Stress Concentration Factor, Sambungan Tubular, Simulasi FEM*

### Abstract

*In offshore structures installation, tubular joints are commonly used. Tubular joints fabricated with welding processes often cause high hot-spot stress (HSS). High value of HSS and stress concentration factor (SCF) in tubular joints will reduce the service life of offshore structures due to fatigue loads. In this study simple tubular junctions T, Y, K, and X were used to obtain HSS and SCF through FEM simulation. The location of the maximum HSS under axial loading varied around the initial crown, in the In-Plane Bending (IPB) loading located after the second crown, while in the Out-of-Plane Bending (OPB) loading it was around the second saddle. In general, the SCF value in the three loading models from the FEM simulation is lower than SCF formula calculations in the previous study, these results are in line with recent SCF review study.*

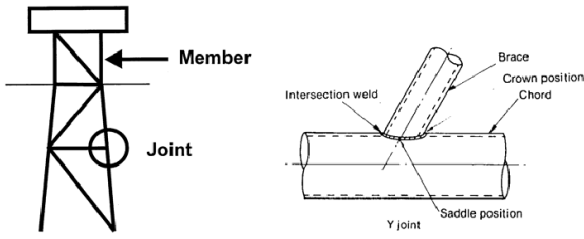
**Keywords:** *Hot Spot Stress, Stress Concentration Factor, Tubular Joint, FEM Simulation*

## 1.0 PENDAHULUAN

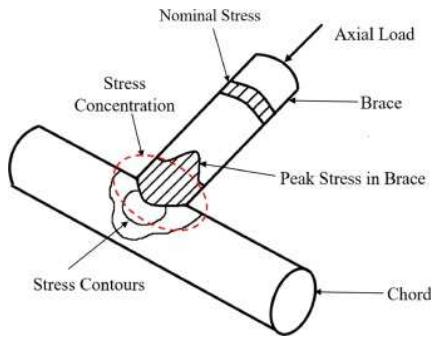
Bangunan lepas pantai senantiasa mengalami beban lingkungan di laut yang bervariasi seperti angin, gelombang dan arus. Variasi beban lingkungan di laut akibat gelombang menimbulkan gaya hidrodinamik yang merupakan faktor kritis dalam analisis *fatigue*. Tegangan yang timbul akibat gaya hidrodinamik ini merupakan tegangan siklik yang secara kontinu dan salam dalam jangka waktu yang lama dapat membuat kekuatan struktur menjadi kritis [1].

Bangunan lepas pantai yang sering dibuat adalah bangunan tipe *Jacket*, karena efektif untuk fasilitas bangunan lepas pantai pada laut yang dangkal. Konstruksi pada bangunan ini terdiri berbagai macam elemen struktur

seperti tubular silinder, pelat, rangka, balok, dan sebagainya. Kekuatan bangunan lepas pantai ini harus memenuhi kriteria dari suatu kode dan standar yang digunakan dalam proses fabrikasinya. Elemen struktur yang digunakan harus dapat menahan beban yang bekerja sesuai dengan kode dan standar yang dipersyaratkan. Elemen struktur berbentuk penampang lingkaran (*tubular member*) dalam berbagai ukuran jamak digunakan pada proses pembuatan *Jacket*. Permasalahan utama dari struktur tubular adalah antara *chord* dengan *brace* seperti terlihat pada Gambar 1 merupakan sambungan kritis, karena posisi pengerjaan pengelasan dan fabrikasi yang cukup rumit serta karakteristik sambungan terhadap beban yang kompleks.



Gambar 1: Tipe anjungan lepas pantai jacket dan sambungan tubular joint



Gambar 2: Letak SCF pada sambungan tubular [4]

Beban pada sambungan tubular akan menimbulkan tegangan *hotspot*, yaitu tegangan maksimum pada kaki sambungan yang besarnya beberapa kali tegangan nominal, sehingga menimbulkan percepatan timbulnya kelelahan pada struktur akibat beban yang berulang (beban siklik). Perbandingan antara tegangan-tegangan *hot-spot* dengan tegangan nominalnya ini disebut *Stress Concentration Factor* (SCF). Semakin besar nilai SCF suatu struktur maka akan memperpendek usia struktur tersebut [2][3].

Penentuan SCF pada sambungan tubular menjadi sangat penting dalam memprediksi umur kelelahan suatu struktur. Penelitian mengenai SCF telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, hingga mendapatkan formula SCF seperti yang dilakukan peneliti terdahulu seperti Kuang [5], Marshall [6], Wordsworth dan Smedley [7] di mana formula-formula SCF tersebut digunakan sebagai acuan perbandingan pada penelitian ini. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan model fisik pada studi penentuan formula SCF, pada studi penentuan SCF ini dicapai dengan menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM) yang kemudian divalidasi dengan menggunakan formula SCF. Adapun tipe sambungan tubular yang dikaji adalah tipe sambungan T, Y, K, dan X.

Tujuan dari penelitian adalah mengetahui nilai dan lokasi *hot-spot stress* pada tipe sambungan tubular T, Y, K, dan X dan membandingkan SCF hasil simulasi FEM dengan kalkulasi berdasarkan formula SCF dari Kuang, Marshall, dan Wordsworth/Smedley [5], [6], [7]. Pada penelitian ini sambungan tubular ini akan diberikan pembebanan sesuai formula SCF sebelumnya, yaitu beban gaya aksial (FA), *In-Plane Bending* (IPB), dan *Out-of-Plane Bending* (OPB).

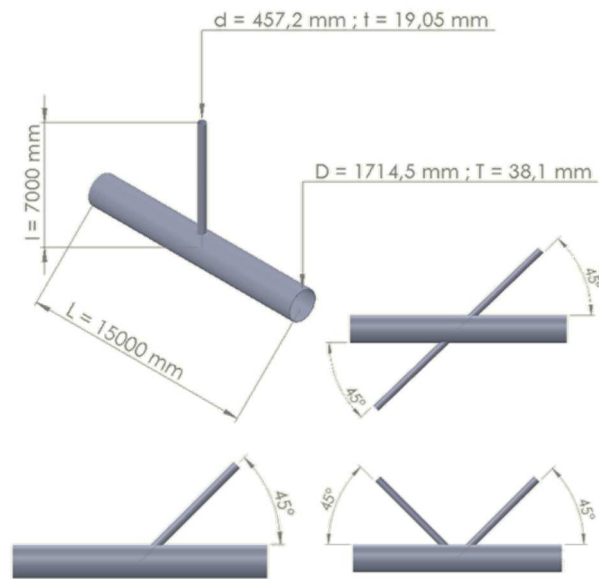
Untuk mendapatkan HSS dan SCF melalui simulasi FEM diperlukan data pendahuluan terkait geometri profil lasan yang hendak dipakai. Data awal geometri yang digunakan mengacu pada batasan geometri dari formula SCF Kuang, Marshall, dan Wordsworth/Smedley [5], [6], [7]. Setelah geometri profil sambungan tubular dibuat dilakukan simulasi FEM dengan tumpuan dan variasi model pembebanan. Dengan memanfaatkan *path load* pada hasil simulasi, maka HSS dapat dihitung dengan metode ekstrapolasi linier. SCF hasil dari simulasi nantinya akan dibandingkan dengan SCF hasil dari perhitungan formula SCF penelitian sebelumnya.

### 2.1. Geometri Sambungan Tubular

Pada penelitian ini geometri untuk semua tipe sambungan tubular (T, Y, K, dan X) dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 3.

Tabel 1 Geometri dari sambungan tubular

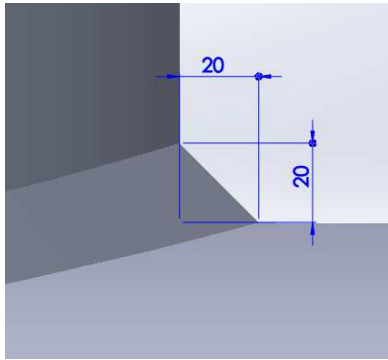
Parameter	Kode	Besaran	Satuan
Diameter <i>Chord</i>	D	1714,5	mm
Diameter <i>Brace</i>	d	457,2	mm
Tebal <i>Chord</i>	T	38,1	mm
Tebal <i>Brace</i>	t	19,05	mm
Panjang <i>Chord</i>	L	15000	mm
Panjang <i>Brace</i>	l	7000	mm
Sudut kemiringan <i>Brace</i>	$\theta$	45	derajat



Gambar 3: Geometri sambungan tubular T, Y, K, dan X

Profil sambungan lasan yang digunakan mengacu pada tabel 5.7 AWS D1.1[8] Untuk tebal *brace* sebesar 19,05 mm maka besar fillet yang direkomendasikan memiliki panjang *leg* pada profil lasan adalah minimum adalah 6 mm. Mengacu juga pada Gurney[9], disarankan pada simulasi FEM besar dari panjang *leg* adalah sekitar setebal dari *brace*, dalam kasus ini digunakan panjang *leg* 20 mm sebagaimana terlihat pada Gambar 4.

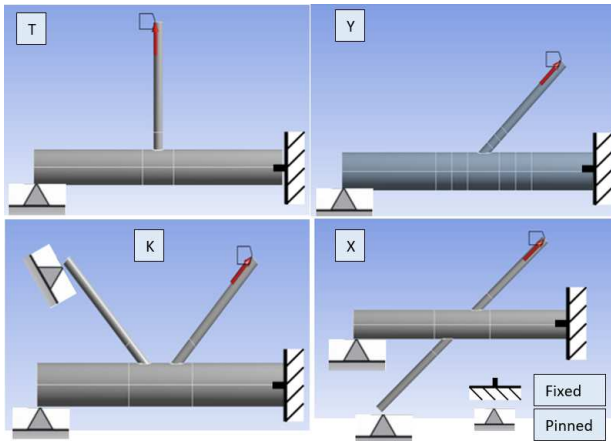
### 2.0 METODE



Gambar 4: Profil lasan pada model sambungan tubular

### 2.2. Sistem Tumpuan dan Kondisi Pembebanan

Sistem tumpuan yang digunakan pada simulasi adalah *fixed* dan *pinned*. Ilustrasi pada Gambar 5 menunjukkan letak tumpuan pada setiap ujung *chord* maupun *brace* untuk sambungan tubular T, Y, K, dan X yang digunakan pada simulasi FEM statis.

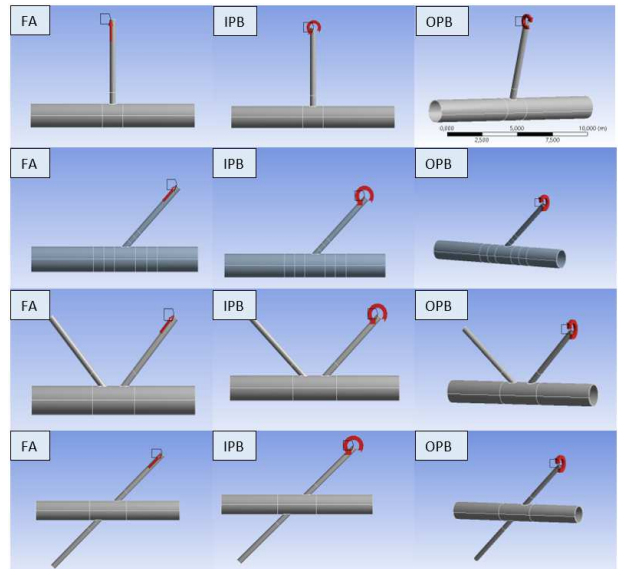


Gambar 5: Sistem tumpuan untuk simulasi pembebanan pada sambungan tubular T, Y, K, dan X

Kondisi pembebanan yang digunakan dalam simulasi mengacu pada besaran beban yang didapatkan pada analisis global [10], yaitu dengan besar gaya aksial digunakan 75,42 MPa dan besar momen digunakan  $5,38 \times 10^8$  N-mm untuk *In Plane Bending* (IPB) dan  $2,09 \times 10^8$  N-mm *Out of Plane Bending* (OPB). Adapun skenario pembebanan yang dilakukan dalam simulasi ini terdapat 3 model simulasi untuk setiap sambungan tubular T, Y, K, dan X sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 6.

Tabel 2: Skenario pembebanan untuk tiap simulasi

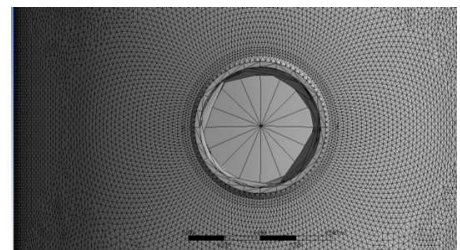
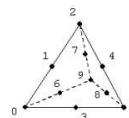
No	Simulasi	Skenario Pembebanan		
		Gaya Aksial FA	Momen IPB	Momen OPB
1	Model 1	v		
2	Model 2		v	
3	Model 3			v



Gambar 6: Pembebanan FA, IPB, dan OPB pada sambungan tubular TYKX, model 1 pada gambar kiri, model 2 pada gambar tengah, model 3 pada gambar kanan

### 2.3. Konsep Metode Elemen Hingga

Untuk melakukan simulasi numerik, geometri lasan dibuat pada perangkat lunak CAD SolidWorks, dan kemudian diteruskan pada perangkat lunak FEM ANSYS Mechanical. Simulasi numerik yang digunakan mengacu pada konsep metode elemen hingga (FEM) dengan membagi model solid menjadi elemen-elemen diskrit, atau biasa dikenal dengan istilah *meshing*. *Meshing* yang dilakukan menggunakan jenis elemen tetrahedral dengan 10 node (tet 10) sebagaimana terlihat pada Gambar 7 [11].



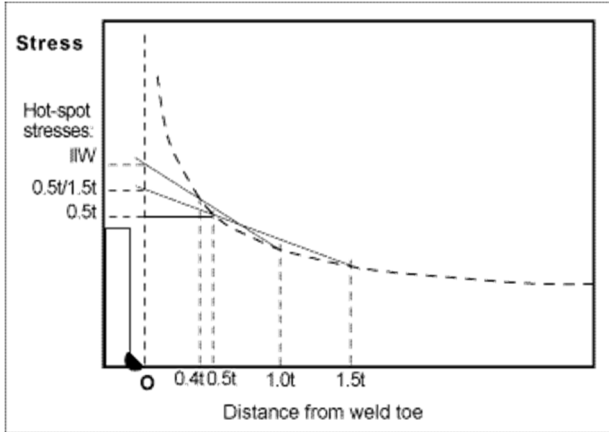
Gambar 7: Tipe elemen tetrahedral 10 node (sebelah kiri) dan hasil *meshing* disekitar dengan sambungan T (sebelah kanan)

Pada Gambar 7 ini juga diperlihatkan hasil *meshing* di sekitar sambungan untuk sambungan T. Tipe elemen tet 10 ini memiliki kelebihan dalam fleksibilitas *meshing* untuk geometri yang tajam dan rumit dibanding dengan jenis elemen hexa (hexa 8 ataupun hexa 20), walau demikian dalam hal kehandalan (robust) hasil tidak terlalu berbeda signifikan dibanding elemen *hexa*. Penggunaan elemen tetrahedral akan meningkatkan jumlah matriks perhitungan untuk FEM yang melonjak hingga tiga kali lipat bila menggunakan elemen *hexa*. Dengan jumlah matriks perhitungan yang besar memiliki konsekuensi bertambahnya durasi lama simulasi FEM[11]. Seiring dengan peningkatan performa hardware komputer dewasa ini, penambahan durasi lama simulasi FEM hanya berbeda dalam hitungan beberapa menit saja untuk simulasi FEM statis.



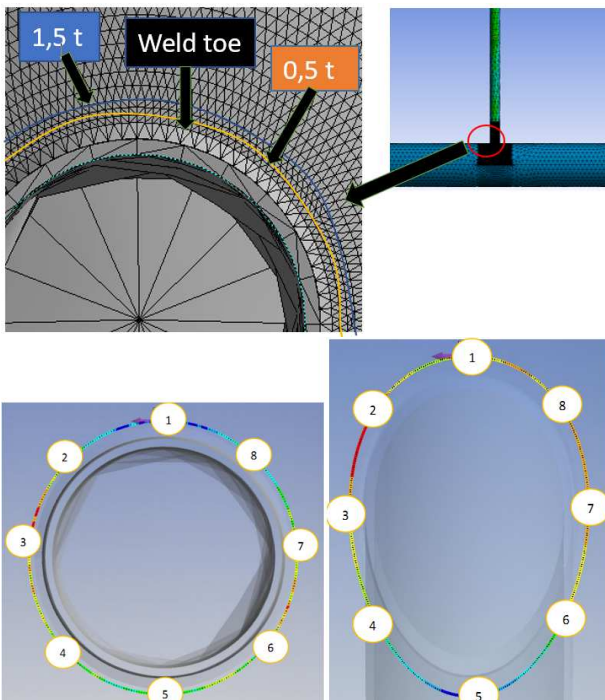
### 2.4. Penentuan Hot Spot Stress dan SCF

Untuk menentukan posisi *hot-spot stress* (HSS), digunakan metode ekstrapolasi linear dari 0,5t (tebal) dan 1,5t menuju ke *weld toe* [12] sebagaimana dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 8.



Gambar 8: Tiga metode penentuan HSS di sekitar *weld toe*[12]

Pada simulasi ini, untuk mendapatkan nilai tegangan pada 0,5t dan 1,5t dibuat *path load* di sekitar *weld toe*. Pada ilustrasi Gambar 9 terlihat *path load* 0,5t dan 1,5t pada sambungan tubular T.



Gambar 9: Posisi *path load* 0,5t dan 1,5t pada sambungan T (gambar atas), penomoran letak posisi pada *path load* berbentuk *loop* (gambar bawah)

Dengan mengacu pada Gambar 1, untuk mempermudah penentuan letak posisi HSS maksimum, maka dibuat penomoran pada *path load* dari angka 1 hingga 8. Angka 1 dan 5 adalah posisi *crown* dan angka 3 dan 7 adalah posisi *saddle*, sebagaimana terlihat pada Gambar 9 bagian bawah. Setelah HSS didapatkan,

dilanjutkan perhitungan SCF dengan menggunakan Persamaan 1.

$$SCF = \frac{HSS}{Nominal\ Stress} \quad (1)$$

Dimana SCF, HSS, dan *Nominal stress* menggunakan satuan MPa. Nilai *Nominal Stress* didapat dengan mengacu pada gambar 8, adalah tegangan pada saat kurva tegangan sudah mulai melandai horizontal. *Nominal Stress* ini didapatkan dari hasil simulasi FEM pada jarak yang cukup dari *weld toe*, dimana nilai tegangan sudah cukup seragam.

### 2.5. Formula SCF Kuang, Marshall, dan Wordsworth/Smedley

Pada penelitian SCF sebelumnya yaitu Kuang, Marshall, dan Wordsworth/Smedley [5], [6], [7] telah didapatkan formula untuk mendapatkan SCF yang telah diringkas pada tabel 3. Dengan mengacu pada tabel 1, untuk memudahkan persamaan SCF maka dibuat persamaan non-dimensional sebagaimana tercantum pada persamaan 2.

$$\beta = \frac{d}{D}; \gamma = \frac{D}{2T}; \tau = \frac{t}{T}; \alpha = \frac{L}{R}; \zeta = \frac{g}{D} \quad (2)$$

Formula SCF Kuang, Wordsworth/Smedley, dan Marshall, dan [5], [6], [7] dapat dilihat pada persamaan (3) – (14)

Persamaan Marshall untuk sambungan T

$$FA \quad SCF_{chord} = [1.5 - 3.88(\beta - 0.47)^2] \gamma^{0.87} \tau^{1.37} \alpha^{0.06} \sin^{1.694} \theta \quad (3)$$

$$IPB \quad SCF_{chord} = [1.65 - 1.1(\beta - 0.42)^2] \gamma^{0.36} \tau^{1.05} \sin^{0.57} \theta \quad (4)$$

$$OPB \quad SCF_{chord} = [1.01 - 3.36(\beta - 0.64)^2] \gamma^{0.95} \tau^{1.18} \sin^{1.56} \theta \quad (5)$$

Persamaan Kuang untuk sambungan Y

$$FA \quad SCF_{chord} = 1.981 \gamma^{0.808} \tau^{1.333} e^{-1.2\beta^3} \alpha^{0.057} \sin^{1.694} \theta \quad (6)$$

$$IPB \quad SCF_{chord} = 0.702 \gamma^{0.60} \tau^{0.86} \beta^{-0.04} \sin^{0.57} \theta \quad (7)$$

$$OPB \quad SCF_{chord} = 1.024 \gamma^{1.014} \tau^{0.889} \beta^{0.787} \sin^{1.557} \theta \quad (8)$$

Persamaan Kuang untuk sambungan K

$$FA \quad SCF_{chord} = 1.506 \gamma^{0.666} \tau^{1.104} \beta^{-0.059} \zeta^{0.067} \sin^{1.521} \theta \quad (9)$$

$$IPB \quad SCF_{chord} = 1.822 \gamma^{0.38} \tau^{0.94} \beta^{0.06} \sin^{0.9} \theta \quad (10)$$

$$OPB \quad SCF_{chord} = 1.024 \gamma^{1.014} \tau^{0.889} \beta^{0.787} \sin^{1.557} \theta \quad (11)$$

Persamaan Wordsworth/Smedley untuk sambungan X

$$FA \quad SCF_{chord} = 1.7 \gamma \tau \beta (2.42 - 2.28 \beta^{2.2}) \sin^{\beta^2(15-14.4\beta)} \theta \quad (12)$$

$$IPB \quad SCF_{chord} = 0.75 \gamma^{0.6} \tau^{0.8} (1.6 \beta^{0.25} - 0.7 \beta^2) \sin^{\beta^2(1.5-1.6\beta)} \theta \quad (13)$$

$$OPB \quad SCF_{chord} = \gamma \tau \beta (1.56 - 1.46 \beta^5) \sin^{\beta^2(15-14.4\beta)} \theta \quad (14)$$

Dari tabel 1 untuk penelitian ini didapatkan nilai  $\beta = 0,27$ ;  $\gamma = 22,5$ ;  $\tau = 0,5$ ;  $\alpha = 17,5$ ;  $\zeta = 0,29$ , dimana nilai-nilai parameter non-dimensional ini masuk dalam kriteria rentang kevalidan dari formula SCF pada persamaan (3) – (14).

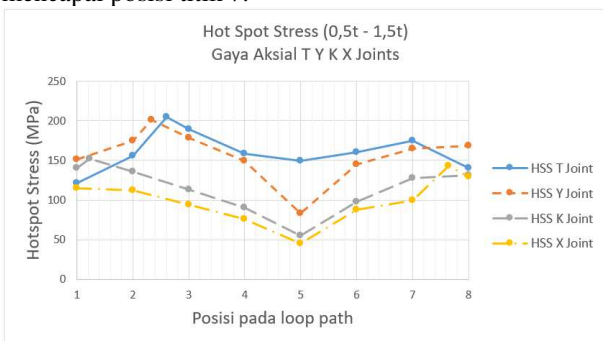
## 3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi model pembebanan 1, 2, dan 3 dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak FEM pembebanan statis. *Meshing* di area sekitar lasan diatur lebih halus

sebagaimana terlihat pada Gambar 7 dan Gambar 9. *Meshing* halus ini bertujuan agar didapatkan hasil resultan tegangan yang baik dan dapat diandalkan. Setelah didapatkan distribusi nilai tegangan pada *path load* yang dibuat pada 0,5t dan 1,5t, kemudian dengan metode ekstrapolasi linear nilai HSS bisa didapatkan.

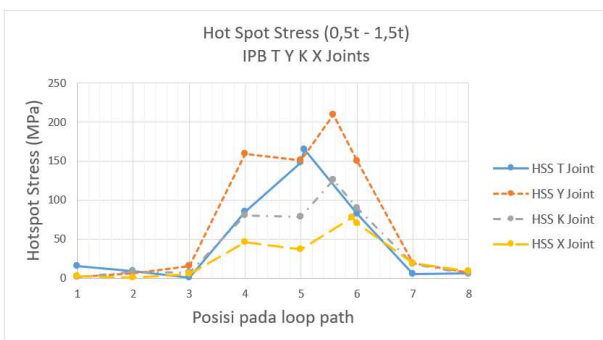
**3.1. Hot-Spot Stress pada Simulasi Model 1, 2, dan 3**

Karakteristik *Hot-Spot Stress* pada masing-masing sambungan tubular ketika dikenai beban aksial seperti pada Gambar 10 memiliki tren bergerak naik mulai titik *crown toe* (titik 1) hingga mencapai posisi puncaknya diantara titik 2 dan 3 untuk sambungan T dan Y, sedangkan sambungan K dan X bergerak naik hanya pada posisi di sekitar *crown toe* (titik 1). Setelah melalui puncaknya masing masing, tren kurva bergerak turun hingga mencapai harga HSS terendah pada posisi *crown heel* (titik 5), kemudian bergerak naik lagi hingga mencapai posisi titik 7.



Gambar 10: *Hot Spot Stress* sambungan T, Y, K, dan X dengan pembeban Axial ditinjau dari 8 posisi pada *path load*

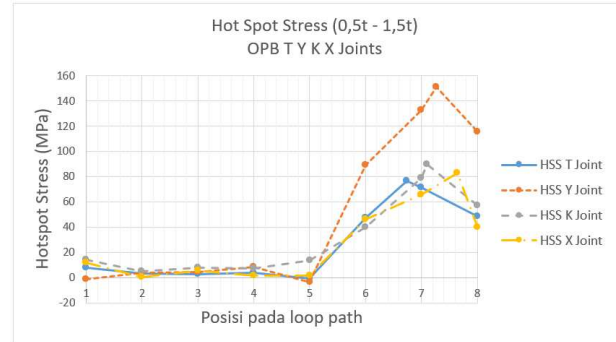
Sedangkan karakteristik pada model 2 untuk masing-masing sambungan tubular ketika dikenai beban IPB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, memiliki tren yang cukup landai pada titik 1 hingga 3, kemudian bergerak naik pada *saddle* (titik 3) hingga mencapai puncak harga *hotspot stress* tertinggi pada daerah sekitar *crown heel* (titik 5). Kurva HSS turun secara signifikan pada titik 7 atau di sekitar *saddle*.



Gambar 11: *Hot Spot Stress* sambungan T, Y, K, dan X dengan pembebanan IPB ditinjau dari 8 posisi pada *path load*

Karakteristik *Hot Spot Stress* model 3 pada masing-masing sambungan tubular ketika dikenai beban OPB memiliki tren yang cukup landai pada titik 1 hingga 5, kemudian bergerak naik pada *crown heel* (titik 5) hingga mencapai puncak harga *hotspot stress* tertinggi pada

daerah sekitar *saddle* (titik 7) sebagaimana terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12: *Hot Spot Stress* sambungan T, Y, K, dan X dengan pembebanan OPB ditinjau dari 8 posisi pada *path load*

Setelah melakukan simulasi dan pengolahan data dan dengan mengacu pada penomoran Gambar 9 didapatkan posisi HSS maksimum pada model 1, 2, dan 3. Posisi HSS tersebut untuk masing-masing model berdasarkan kondisi model pembebanannya ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3: Posisi HSS sambungan T, Y, K, dan X pada model simulasi 1,2, dan 3

Simulasi	Posisi <i>Hot-Spot Stress</i> pada sambungan			
	T	Y	K	X
Model 1 (FA)	2-3	2-3	1-2	7-8
Model 2 (IPB)	5-6	5-6	5-6	5-6
Model 3 (OPB)	6-7	7-8	7-8	7-8

Pada Model 1 nilai HSS pada kurva relatif ada lonjakan tajam. Nilai HSS sambungan T dan Y terletak pada posisi 2 ke 3 (menuju *saddle* pertama), untuk sambungan K pada posisi 1 ke 2 (meninggalkan *crown* pertama), sedangkan pada sambungan X pada posisi 7 ke 8 (menuju *crown* pertama). Pada Model 2 beban IPB nilai HSS tertinggi pada posisi 4 ke 6 (sekitar *crown* kedua), sehingga dapat disimpulkan nilai maksimum HSS terletak pada posisi 5 ke 6 (meninggalkan *crown* kedua) untuk sambungan T, Y, K, dan X. Sedangkan pada model 3 beban OPB nilai HSS maksimum terletak pada posisi 6 ke 8, dengan perincian pada sambungan T letak HSS maksimum pada posisi 6 ke 7 (menuju *saddle* kedua), dan ada kesamaan pada sambungan Y, K, dan X letak HSS maksimum semuanya terletak pada posisi 7 ke 8 (menuju *crown* pertama).

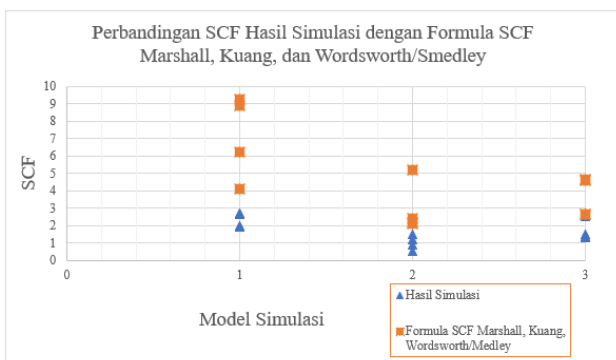
**3.2. Stress Concentration Factor sambungan T, Y, K, dan X**

Untuk mendapatkan SCF dengan menggunakan Persamaan 1, perlu didapatkan harga *Nominal Stress* terlebih dahulu melalui hasil simulasi FEM sebagaimana telah dijelaskan pada bagian 2.5. Adapun hasil *Nominal Stress* dan perhitungan SCF dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil perhitungan SCF dengan mengikuti formula SCF (3) – (14) tersaji pula pada Tabel 4.

Tabel 4: Perhitungan SCF hasil simulasi dan perhitungan formula SCF Marshall, Kuang, dan Wordswoth/Smedley.

Simulasi	Tegangan pada T Joint			
	HSS Max (MPa)	$\sigma$ nominal (MPa)	SCF	SCF Marshall
Model 1	205,31	75,42	2,72	9,24
Model 2	165,24	138,34	1,19	2,41
Model 3	76,63	59,08	1,31	4,61
Simulasi	Tegangan pada Y Joint			
	HSS Max (MPa)	$\sigma$ nominal (MPa)	SCF	SCF Kuang
Model 1	201,51	75,42	2,67	6,23
Model 2	209,76	138,35	1,52	2,17
Model 3	151,02	59,09	2,56	2,68
Simulasi	Tegangan pada K Joint			
	HSS Max (MPa)	$\sigma$ nominal (MPa)	SCF	SCF Kuang
Model 1	152,04	75,42	2,02	4,11
Model 2	125,63	138,34	0,91	2,1
Model 3	89,73	59,09	1,52	2,68
Simulasi	Tegangan pada X Joint			
	HSS Max (MPa)	$\sigma$ nominal (MPa)	SCF	SCF Wordswoth/Smedley
Model 1	143,31	75,42	1,9	8,89
Model 2	78,08	138,34	0,56	5,23
Model 3	83,04	59,08	1,41	4,66

Dari data tabel 4, dapat dibuat perbandingan SCF hasil simulasi dengan SCF dari formula (3) – (14) sebagaimana tersaji pada Gambar 13.



Gambar 13: Perbandingan SCF hasil simulasi dan perhitungan formula SCF

Dapat terlihat pada model 1 beban gaya aksial FA terdapat perbedaan nilai SCF yang besar. Hasil simulasi model 1 ini bervariasi dari 1,9 hingga 2,72, sedangkan pada perhitungan formula SCF bervariasi dari 4,11 hingga 9,24. Pada model 2 dengan pembebanan IPB variasi SCF hasil simulasi adalah 0,56 hingga 1,52 namun pada SCF hasil perhitungan formula SCF didapatkan nilai dari 2,1 hingga 5,23. Pada model 3

dengan pembebanan OPB terlihat jarak SCF yang lebih dekat, dimana variasi SCF hasil simulasi dimulai dari 1,3 hingga 2,56 dan variasi SCF hasil dari perhitungan formulas SCF bervariasi dari 2,68 hingga 4,66. Secara umum didapatkan SCF hasil simulasi lebih kecil daripada SCF hasil dari perhitungan simulasi dimana hal ini juga sejalan dengan hasil penelitian terkini [4] terkait SCF pada sambungan tubular.

#### 4.0 KESIMPULAN

Simulasi FEM statis dengan menggunakan metode ekstrapolasi linier pada *path load* 0,5t – 1,5t menghasilkan *path load* HSS berbagai sambungan tubular T, Y, K, dan X. Posisi HSS maksimum pada *path load* model 1 beban aksial (FA) sambungan T dan Y berada pada posisi menuju *saddle* pertama, sementara pada sambungan K setelah *crow*n pertama, sedangkan pada sambungan X berada menuju *crow*n pertama. Pada *path load* model 2 beban IPB letak HSS maksimum semua sambungan memiliki kemiripan yaitu berada setelah *crow*n kedua. *Path load* model 3 dengan beban OPB posisi HSS maksimum berada disekitar *saddle* kedua, pada sambungan T menuju *saddle* kedua, sementara pada sambungan Y, K, dan X meninggalkan *saddle* kedua.

Pada studi perbandingan SCF sambungan tubular T, Y, K, dan X hasil simulasi dan formula SCF Kuang, Marshall, Wordswoth/Smedley [5], [6], [7] hasil SCF pada model 1 beban gaya aksial FA terdapat perbedaan gap nilai SCF yang besar. Hasil simulasi model 1 ini bervariasi dari 1,9 hingga 2,72, sedangkan pada perhitungan formula SCF bervariasi dari 4,11 hingga 9,24. Pada model 2 dengan pembebanan IPB variasi SCF hasil simulasi dalam rentang 0,56 hingga 1,52 namun pada SCF hasil perhitungan formula SCF didapatkan nilai dalam rentang 2,1 hingga 5,23. Pada model 3 dengan pembebanan OPB terlihat jarak SCF yang lebih dekat, dimana variasi SCF hasil simulasi dimulai dari 1,3 hingga 2,56 dan variasi SCF hasil dari perhitungan formulas SCF bervariasi dari 2,68 hingga 4,66.

Secara umum didapatkan SCF hasil simulasi lebih kecil daripada SCF hasil dari perhitungan simulasi dimana hal ini juga sejalan dengan hasil penelitian terkini [4] terkait SCF. Pemodelan FEM memiliki kelebihan tingkat presisi hasil dibanding dengan model skala fisik dari penelitian formula SCF Kuang, Marshall, Wordswoth/Smedley [5], [6], [7] dimana perhitungan formula SCF ini berdasarkan pada hasil pembacaan sensor alat untuk model skala percobaan fisik. Keterbatasan pada model skala fisik adalah masih merupakan pendekatan untuk ukuran *full-scale* [4], sehingga hasil formula SCF yang dihasilkan waktu itu masih tinggi, dimana di tahun-tahun berikutnya untuk pendekatan desain hasil masih terus di-*review* dan direvisi [4].

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. L. Tawekal, Fitriany, and M. T. Tukuboya, "Pengembangan Formula SCF untuk Analisa Kelelahan Joint (Sambungan) T pada Struktur Bangunan Lepas Pantai," *J. Tek. Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 33–40, 2006.
- [2] A. Naess, *Fatigue Handbook Offshore Steel Structure*. Tapir, 1985.
- [3] Lloyd's Register, "Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints - Assessment of Existing and Development of New Parametric Formulae," London, 1997.
- [4] D. SinghSaini, D. Karmakar, and S. Ray-Chaudhuri, "A review of stress concentration factors in tubular and non-tubular joints for design of offshore installations," *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 186–202, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2016.06.006>.
- [5] J. G. Kuang, A. B. Potvin, and R. D. Leick, "Stress concentration in tubular joints," *Offshore Technol. Conf.*, 1975.
- [6] P. W. MARSHALL, "A review of stress concentration factors in tubular joints," Houston, 1978.
- [7] A. C. Wordsworth and G. P. Smedley, "Stress concentrations at unstiffened tubular joints," *Eur. Offshore Steels Res. Semin.*, 1978.
- [8] AWS, *Structural Welding Code - Steel*. 2015.
- [9] T. R. Gurney, "Thickness Effect in 'Relatively Thin' Welded Joints," Cambridge, 1995.
- [10] N. Pamungkas, "Tugas Kuliah - Analisa Global Sambungan Tubular Bangunan Lepas Pantai tipe Jacket," Surabaya, 2015.
- [11] ANSYS, *V11.0 Documentation*. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- [12] S. J. Maddox, "Recommended Hot-Spot Stress Design S-N Curves for Fatigue Assessment of FPSOs," *Int. Offshore Polar Eng. Conf.*, vol. 10, 2001.