

## PENENTUAN UMUR STRUKTUR SENDI (T-JOINT) BERDASARKAN PERHITUNGAN KELELAHAN TEGANGAN STRUKTUR

Hery Sunarsono\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITEBA - Institut Teknologi Batam, Tiban Ayu, Sekupang, Batam 29425, 0778-3540666

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Industri, ITEBA

e-mail: \*[hery.sunarsono@gmail.com](mailto:hery.sunarsono@gmail.com)

### Abstrak

Keakuratan perhitungan umur suatu struktur terhadap fatigue/kelelahan sangat dipengaruhi oleh analisa tegangan. Analisa ini pada struktur sendi las (T-joint) menjadi rumit karena banyaknya parameter yang mempengaruhinya. Faktor geometri, misalnya, dapat menaikkan harga tegangan secara drastis pada area takik las. Methoda elemen hingga/ finite element sangat membantu dalam menganalisa tegangan di daerah takik las ini dengan kondisi pemilihan model elemen yang sesuai. Studi kasus dalam tulisan ini menggunakan analisa tegangan titik kritis untuk menentukan umur kelelalahan struktur sendi las.

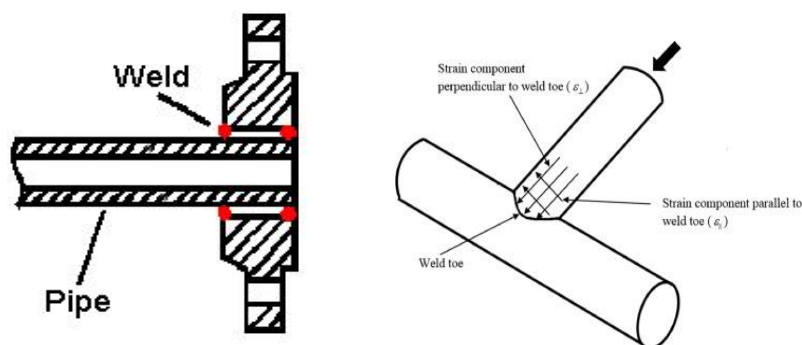
**Kata kunci**— kelelahan, struktur sendi, tegangan titik ktitis, methoda elemen hingga

### Abstract

Accuracy of lifetime from welded structure's fatigue calculation will be depend on the stress's analysis. Its parameter become more and more complex if a structure relied each others with special condition. Global and local geometric effects, is one of some parameters that increases stress concentration on the welded toe. Finite element method, with the finest choice of mesh and nodal element is a useful tool for structure's model and simulation. In this paper, hot spot stress's analysis been applied on the welded structure T-joint for fatigue's calculation.

**Keywords**— fatigue, T-joint, hot spot stress, finite element method

## PENDAHULUAN

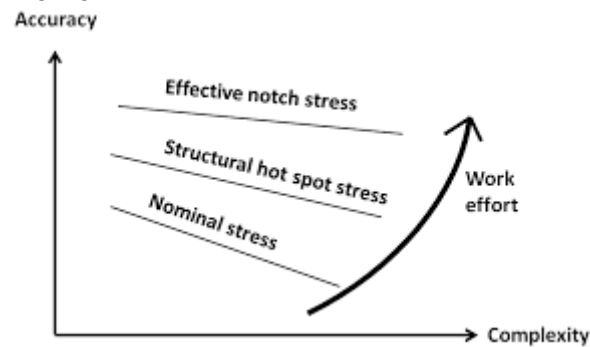


Gambar 1. T-Joint

Dalam suatu struktur, kita sering menjumpai struktur sendi (*T-joint*) yang diperoleh dengan proses pengelasan/ *welding* seperti tertera pada gambar 1. Tempat tersebut sering merupakan tempat terpusatnya tegangan (*stress concentration*) di mana keretakan berawal. Analisa tegangan di daerah ini memerlukan ketelitian serta kejelian dalam membuat pendekatan/ asumsi. Dalam tulisan ini, kita melihat beberapa pendekatan yang berguna untuk memecahkan masalah ini yang didasari pada penerapan analisa tegangan yang sesuai.

Ada tiga pendekatan dasar :

- (1).pendekatan tegangan nominal/ *nominal stress*,
- (2).pendekatan tegangan titik kritis/ *hot spot stress* dan
- (3).pendekatan tegangan takik lokal/ *local notch stress*.



Gambar 2. Grafik pendekatan tegangan

Pendekatan tegangan takik lokal lebih kompleks dalam pemodelan tetapi akan memberikan hasil yang akurat dibandingkan dengan dua analisa yang lain.

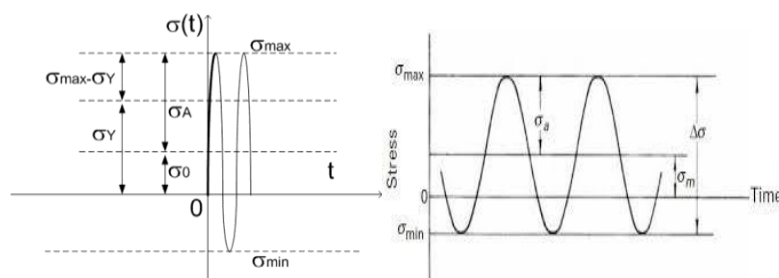
Pengetahuan tentang methoda elemen hingga (MEH) sangat membantu dalam analisa ketiga pendekatan ini, tentu saja dengan pemilihan model elemen (*mesh*) yang sesuai.

## METODE PENELITIAN

### 1. DEFINISI

#### 1.1. Daerah kerja tegangan/ *stress range*

Daerah kerja tegangan ( $\Delta\sigma$ ) merupakan parameter penting dalam analisa kelelahan/ *fatigue* yang didefinisikan sebagai perbedaan antara tegangan maksimal ( $\sigma_{\max}$ ) dan tegangan minimal ( $\sigma_{\min}$ ).



Gambar 3. Daerah kerja tegangan

#### 1.2. Tegangan nominal

Tegangan nominal merupakan tegangan yang didapat dari teori elastisitas klasik, misalnya :

$$x = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

Di mana :

N : gaya aksial

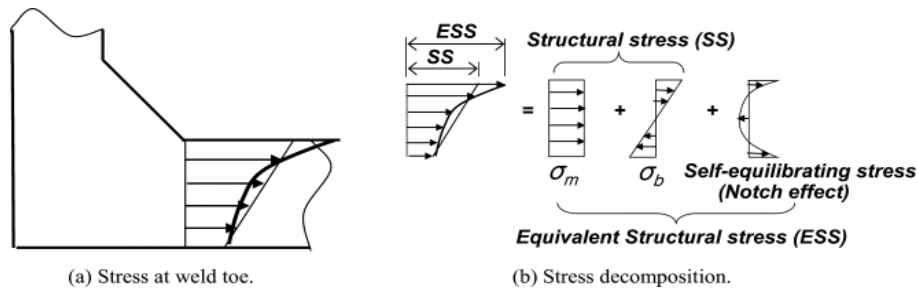
A : luas penampang melintang

M : momen tekuk/ *bending moment*

W : koefisien modulus/ *section modulus*

### 1.3. Tegangan struktural/ *Equivalen Structural Stress (ESS)*

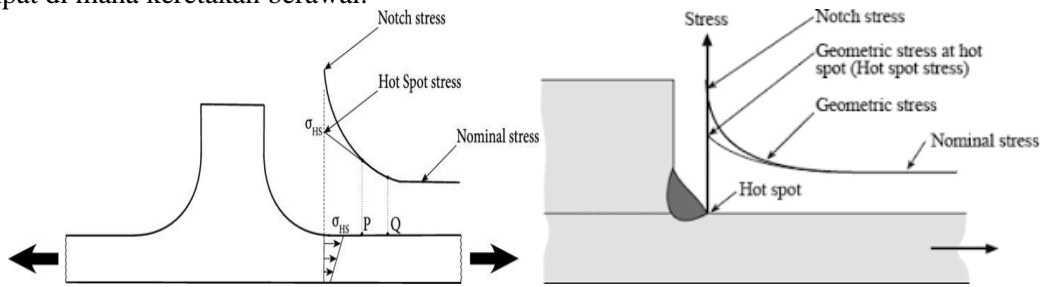
Tegangan ini dibagi menjadi 2 komponen, tegangan membran ( $\sigma_m$ ) dan tegangan tekuk/ *shell bending* ( $\sigma_b$ ) yang didapat dari teori cangkang/shell [2,3].



Gambar 4. Tegangan Struktural

### 1.4. Tegangan titik kritis/ *hot spot stress*

Tegangan titik kritis adalah tegangan struktural di titik kritis dalam suatu struktur sendi, tempat di mana keretakan berawal.

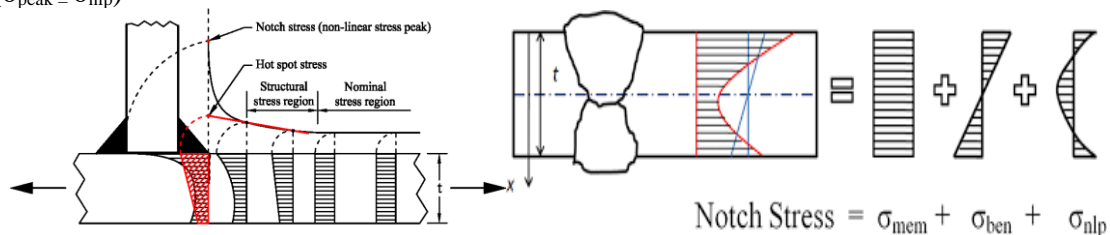


Gambar 5. Tegangan titik Kritis

### 1.5. Tegangan puncak/ *non-linier stress peak/ notch stress*

Bagian ketidaklinieran dari distribusi tegangan (yang biasanya) ke arah ketebalan karena pengaruh takik/ *notch*. Untuk memisahkan tegangan ini dari tegangan struktural, diperlukan analisa tegangan yang lebih terperinci seperti gambar 6 di bawah.

Ilustrasi pada gambar pertama adalah tegangan membrane ( $\sigma_m = \sigma_{mem}$ ), yang kedua adalah tegangan tekuk/ *shell bending* ( $\sigma_b = \sigma_{ben}$ ) yang didapat dengan menarik garis lurus lewat titik tengah. Gradien tegangan tekuk terdefinisi dengan mengasumsikan bahwa momen dari bagian ketidaklinier/ *non linier* mempunyai harga nol disekitar titik tengah/ pusat (yang dikenal dengan istilah *self equilibrating*). Tegangan puncak merupakan harga tegangan di permukaan ( $\sigma_{peak} = \sigma_{nlp}$ )



Gambar 6. Analisa tegangan puncak

### 1.6. Tegangan efektif

Secara umum, tegangan ini didefinisikan sebagai tegangan di permukaan struktur yang mempengaruhi harga daerah kerja tegangan ( $\Delta\sigma$ ) paling besar, yang mengontrol fenomena kelelahan/ fatigue dalam struktur sendi.

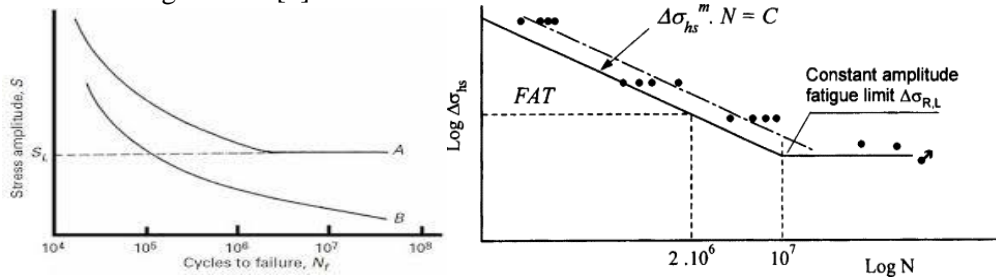
### 1.7. Tegangan residual

Tegangan yang diakibatkan oleh proses fabrikasi, yang mengakibatkan perubahan karakteristik fatigue suatu struktur.

### 1.8. Kurva wohler/ kurva S-N

Kurva wohler didapat melalui eksperimental, merupakan kurva variasi dari tegangan dinamik dalam skala logaritmik untuk menggambarkan jumlah siklus tegangan yang menyebabkan keretakan suatu struktur.

Kurva wohler untuk konfigurasi spesial dari suatu struktur sendi dapat diketemukan dalam buku/ katalog standar [4].



Gambar 7. Kurva wohler

## 2. Faktor faktor yang berpengaruh / menaikkan nilai tegangan

### 2.1. Faktor geometri global

Faktor ini umumnya dapat dianalisa dengan teori elastisitas, beberapa contoh dari faktor ini adalah :

- adanya lubang/ *large opening*
- struktur yang bengkok/ *curved beam*
- struktur yang terdistorsi/ *distortion of cross section*
- struktur yang berkeriput/ *flange curling*

Faktor geometri global mempengaruhi distribusi tegangan selaput/ *membrane* dalam arah ketebalan, misalnya struktur yang terdistorsi (pada penampang melintang) akan menaikkan harga tegangan tekuk dari bidang cangkang/ *shell*.

Di dalam perhitungan, terutama pendekatan tegangan nominal, koreksi akibat diskontinuitas geometri global ini harus diikut sertakan dalam analisa tegangan nominal.

### 2.2. Faktor geometri lokal

Faktor geometri lokal ini sebagian besar diakibatkan oleh kesalahan produksi/ fabrikasi. Beberapa diskontinuitas geometri lokal yang menyebabkan perubahan distribusi tegangan lokal dari tegangan membrane dan/ atau tegangan tekuk/ *shell bending* lokal, antara lain :

- ketidaklurusan penyambungan (*offset & angular misalignment*),
- perubahan ketebalan,
- ujung/ akhir dari penguat (*stiffener & plate end*)

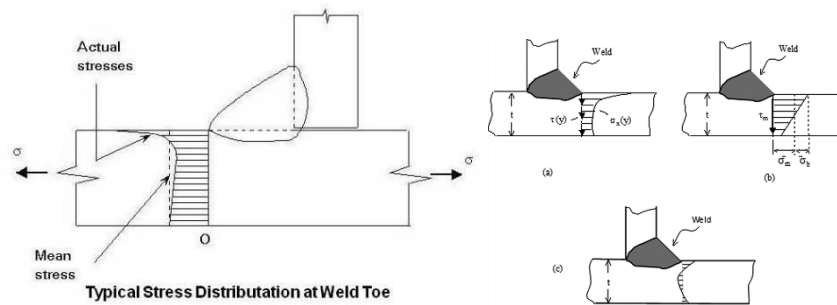
Berbeda dengan faktor geometri global, konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh faktor ini sebagian besar tidak dapat dianalisa dengan methoda analitis. Methoda elemen hingga sangat membantu dalam analisa ini. Beberapa diskontinuitas spesial dapat kita dapatkan faktor koreksinya (*stress concentration factor*) dalam buku katalog atau dapat dicari ekspresi analitisnya dengan menggunakan fungsi Petroski/ *Petroski Achenbach crack opening displacement* [5].

### 2.3. Faktor takik lokal

Pengaruh utama dari takik lokal ini adalah ketidaklinier (*non-linier*) distribusi tegangan, biasanya dalam arah melintang/ ketebalan. Hal ini disebabkan karena perubahan struktur karena (antara lain) :

- adanya lubang kecil,
- hasil pemotongan yang kasar

Tegangan puncak adalah tegangan lokal di dasar/ asal takik, yang harganya melampaui distribusi tegangan linier. Daerah tegangan takik ini terletak sekitar  $0.2 t$  ( $t$  : ketebalan) dari dasar takik, tempat asal penjarangan keretakan suatu struktur [5,7].



Gambar 8. Distribusi tegangan pada pengelasan sepatu

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. PENDEKATAN

#### 1.1. Pendekatan tegangan nominal/ nominal stress

Penentuan kurva wohler (kurva S-N) dilakukan secara eksperimental dengan mengambil sampel atau keseluruhan dari struktur, dengan memperhitungkan pengaruh geometri lokal dan takik lokal akibat kesalahan fabrikasi. Dalam tahap desain, analisa tegangan harus koheren dengan prosedur determinasi kurva wohler. Tetapi di sini faktor geometri global harus diperhitungkan dalam analisa tegangan nominal [5].

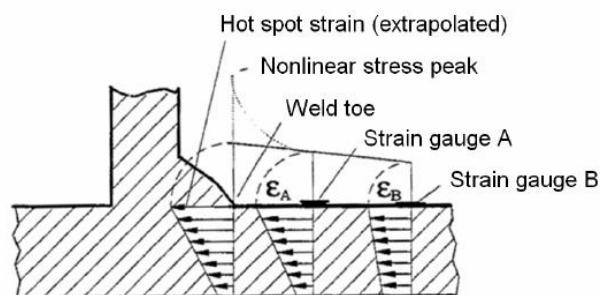
Pendekatan ini banyak digunakan dalam analisa kelelahan/ *fatigue*, karena banyaknya prosedur standar (katalog) mengacu pada methoda ini. Beberapa kondisi untuk mendapatkan hasil yang baik :

- tegangan nominal dapat dianalisa dengan benar, tidak rancu dengan efek geometri global.
- faktor geometri lokal dapat ditemukan dalam buku katalog.
- variasi amplitudo dari gaya yang bekerja tidak mengakibatkan daerah kerja tegangan ( $\Delta\sigma$ ) bernilai terlalu kecil dibanding harga amplitudo ambang batas kelelahan/ *endurance*.

#### 1.2. Pendekatan tegangan titik kritis/ hot spot stress

Pendekatan ini digunakan untuk analisa kelelahan/ *fatigue* yang lebih mendetail, kemana arah keretakan akan berkembang. Aspek eksperimental untuk menentukan kurva wohler dilakukan dengan cara extrapolasi dari harga regangan struktural di sekitar sendi (yang diperoleh dari alat ukur regangan/ *strain gauge* ).

Penempatan *strain gauge* ini tidak boleh terlalu dekat dengan sendi/ takik supaya faktor takik lokal tidak memengaruhi dalam pengukuran (lihat gambar 9).

Gambar 9. Penempatan *Strain Gauge*

Dalam desain, analisa tegangan/ regangan harus memberikan hasil yang koheren dengan pendekatan ini. Model elemen hingga banyak digunakan dalam analisa ini. Perlu dicatat di sini bahwa tegangan di titik kritis selalu 2 arah/ *biaxial*. Analisa tegangan dengan methoda elemen hingga juga mengikut sertakan efek ini. Dengan demikian, hasil analisa ini tidak dapat dibandingkan langsung dengan kurva wohler (hasil dari extrapolasi harus dianalisa lebih lanjut).

Keuntungan dari pendekatan ini adalah untuk analisa beberapa macam konfigurasi sendi hanya diperlukan satu kurva wohler, dengan asumsi bahwa pengaruh variasi dari takik lokal sangat kecil. Kelemahan methoda ini adalah tidak adanya pemisahan antara tegangan membran dan tegangan tekuk/ *shell bending*.

Pendekatan ini banyak digunakan jika arah orientasi struktur sendi melintang dari arah fluktuasi gaya/ tegangan, serta keretakan dianggap berawal dari batas struktur sendi/ takik. Dibandingkan dengan pendekatan tegangan nominal, pendekatan ini lebih menguntungkan dalam kondisi :

- tegangan nominal tercampur dengan efek dari faktor geometri.
- faktor geometri lokal tidak ditemukan dalam katalog.
- harga regangan struktural di sekitar sendi dapat diperoleh dari *strain gauge*

Seperti dalam pendekatan tegangan nominal, pendekatan ini akan menghasilkan analisa yang salah jika variasi dari amplitudo gaya yang bekerja mengakibatkan harga daerah kerja tegangan ( $\Delta\sigma$ ) terlalu kecil dibanding amplitudo batas *endurance*.

### 1.3. Pendekatan regangan takik lokal/ *local notch stress*

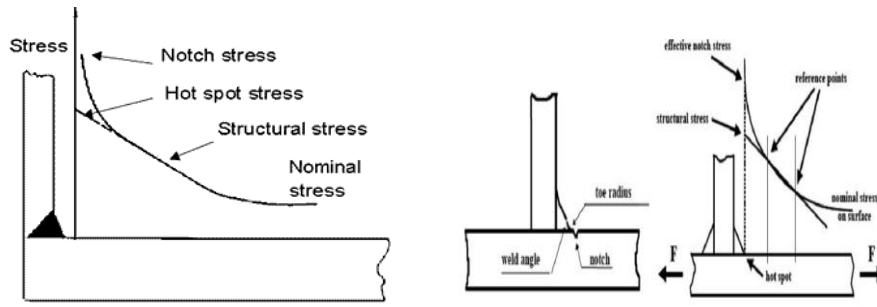
Berbeda dengan pendekatan sebelumnya, pendekatan ini didasarkan pada sifat material/ *property material*. Di dalam pendekatan ini semua faktor yang menaikkan harga tegangan harus diikuti sertakan dalam analisa tegangan/ regangan. Methoda ini sangat bermanfaat jika terjadi efek plastisitas secara periodik/ *cyclic plasticity* di daerah takik.

Analisa tegangan dalam pendekatan ini dibagi menjadi dua:

1. Tegangan titik kritis di sekitar takik dianalisa seperti pada pendekatan sebelumnya dan digunakan sebagai tegangan nominal.
2. Tegangan puncak diperoleh dengan menggunakan methoda elemen hingga.

Daerah kerja tegangan atau regangan elastik-plastik lokal ( $\Delta\sigma$  dan  $\Delta\epsilon$ ) di dasar takik kemudian dianalisa dengan menggunakan kurva tegangan-regangan periodik/ *cyclic* dari material [6].

Berbeda dengan kedua pendekatan sebelumnya yang memprediksi keretakan total suatu struktur, pendekatan ini memprediksi keretakan awal di daerah takik.



Gambar 10. Pendekatan Regangan Takik Lokal

Kelemahan methoda ini antara lain :

- Dalam pemrograman methoda elemen hingga, pendekatan ini memerlukan banyak sekali data dari sifat material/ *property of material*.
- Pendekatan ini sangat sensitif terhadap estimasi tegangan residual.

## 2. MODEL RESOLUSI METHODA ELEMEN HINGGA

### 2.1. Tegangan nominal

Methoda elemen hingga sangat membantu dalam analisa tegangan ini, terutama jika :

- faktor geometri global tidak dapat ditentukan secara analitis.
- struktur hyperstatik

Pemilihan model elemen hingga yang sesuai sangat menentukan ketepatan analisis. Misalnya pemilihan elemen cangkang yang tipis/ *thin shell element* pada struktur sendi las sebagai model memberikan hasil yang baik dibandingkan elemen pejal/ *solid* [2,3]

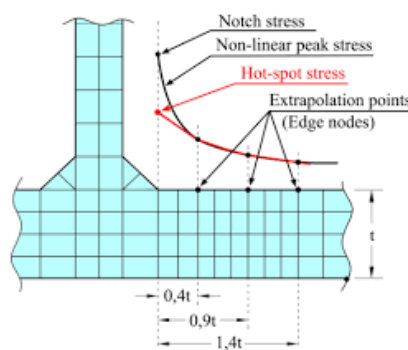
### 2.2. Tegangan titik kritis

Semua methoda analisa fatigue yang menggunakan tegangan titik kritis, tidak ada yang mengikut sertakan secara implisit faktor kesalahan fabrikasi dalam penentuan kurva wohler. Kesalahan fabrikasi ini harus dianalisa dengan model elemen hingga yang tepat.

Di sini data tegangan diambil dari titik nodal di sekitar daerah kritis. Untuk itu diperlukan model elemen yang halus/ *refined* di sekitar daerah kritis, untuk mendapatkan data yang koheren dengan data eksperimental (methoda extrapolasi).

### 2.3. Tegangan puncak/ non linear stress peak

Resolusi tegangan ini dengan menggunakan methoda elemen hingga, memerlukan model elemen/ *mesh* yang halus. Model dua dimensi akan memberikan hasil yang baik jika daerah/ area takik cukup luas.



Gambar 11. Tegangan puncak

### 2.4. Superposisi faktor geometri global dan lokal

Untuk menghindari keruwetan analisa tegangan, maka diperlukan penyederhanaan suatu model. Misalnya dengan mempertimbangan faktor ketidakkontinyuan/ diskontinuitas geometri lokal dimasukkan ke dalam tegangan nominal.

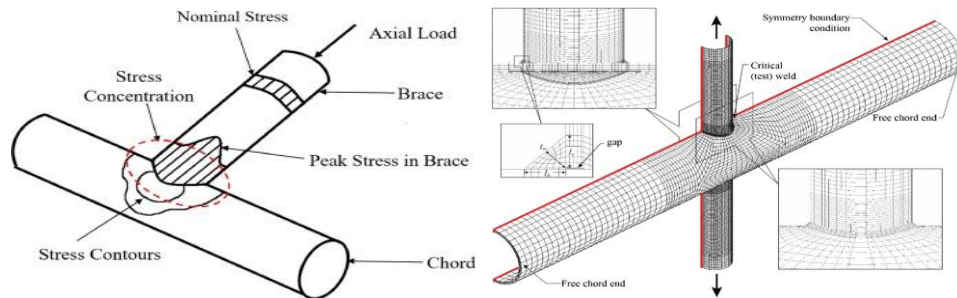
Hal ini dilakukan dengan mengisolasi daerah tegangan maksimal dengan memberikan model yang lebih halus, tetapi tegangan yang bekerja yang digunakan adalah tegangan pada model awal.



Sebagai catatan bahwa methoda ini memerlukan analisa lanjutan untuk mengetahui besarnya kesalahan akibat proses penyederhaan dalam pemodelan.

### 3. STUDI KASUS "TEGANGAN TITIK KRITIS PADA STRUKTUR SENDI LAS"

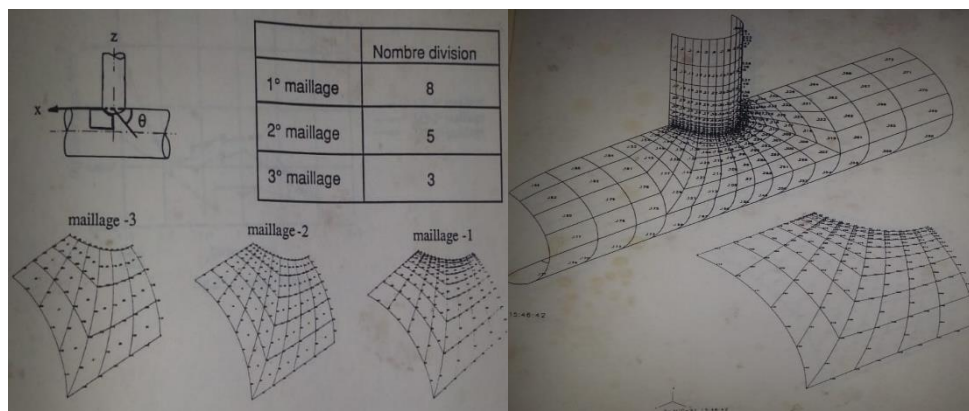
Studi dalam tulisan ini menggunakan software CASTOR-SD ver 1.0 yang dikembangkan oleh Centre Technique des Industries Mecaniques (CETIM) Perancis pada tahun 1991 [9].



Gambar 12. Tegangan Titik Kritis

#### 3.1. Pemilihan elemen dalam methoda elemen hingga [2,3,5,7,9] :

- Elemen cangkang tipis (*thin shell*) dengan 9 titik parameter/ nodal
- Dimensi dari elemen hingga di sekitar daerah takik (*weld toe*) ditentukan sedemikian rupa supaya pusat dari elemen tersebut terletak kurang dari 0.4 kali tebal struktur tabung/ *chord* dari garis takik.
- Dimensi maksimal dari elemen yang jauh dari daerah takik tidak melebihi setengah dari jari-jari tabung.
- Untuk menghindari pengaruh dari takik pada analisa stuktur sendi, maka panjang dari tabung di luar takik minimal harus satu setengah kali dari diameter-nya dan untuk tabung penopang/ *brace* minimal harus dua kali dari diameter-nya

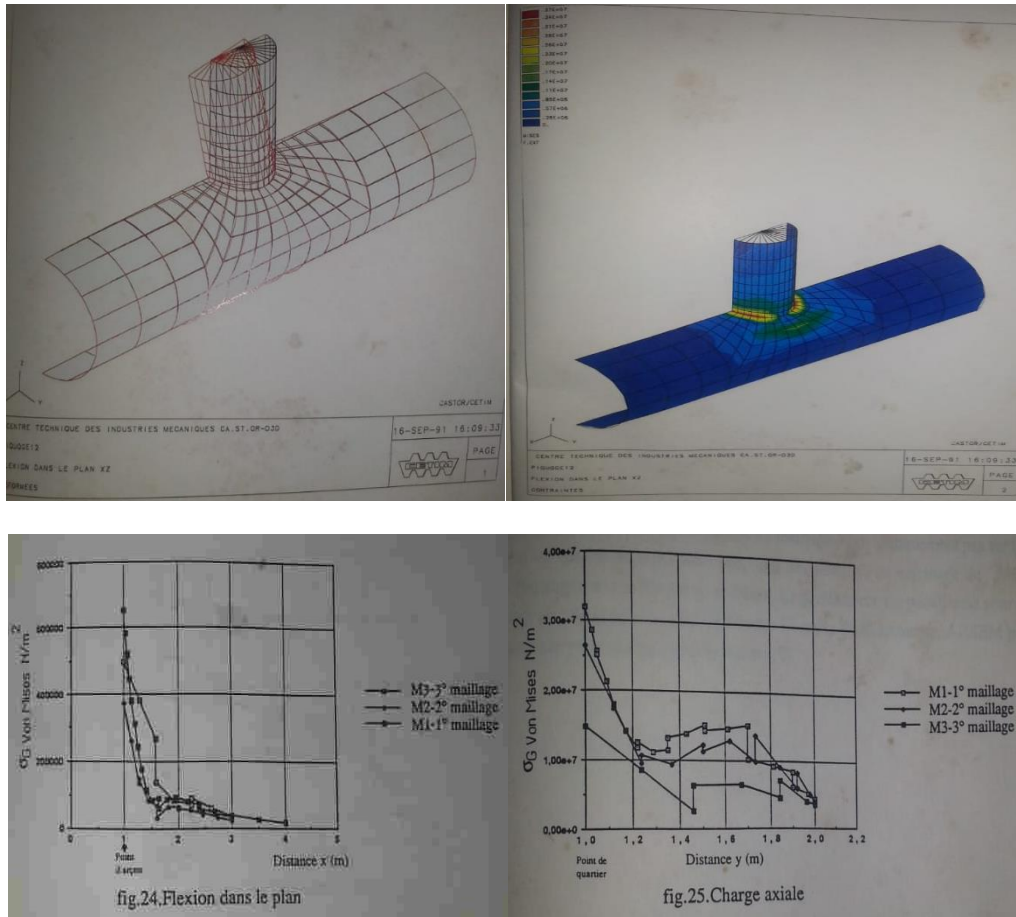


Gambar 13. Methoda elemen hingga

#### 3.2. Analisa tegangan titik kritis/ hot spot stress [9]

Distribusi tegangan dengan menggunakan "tegangan titik kritis" tertera pada grafik di bawah :



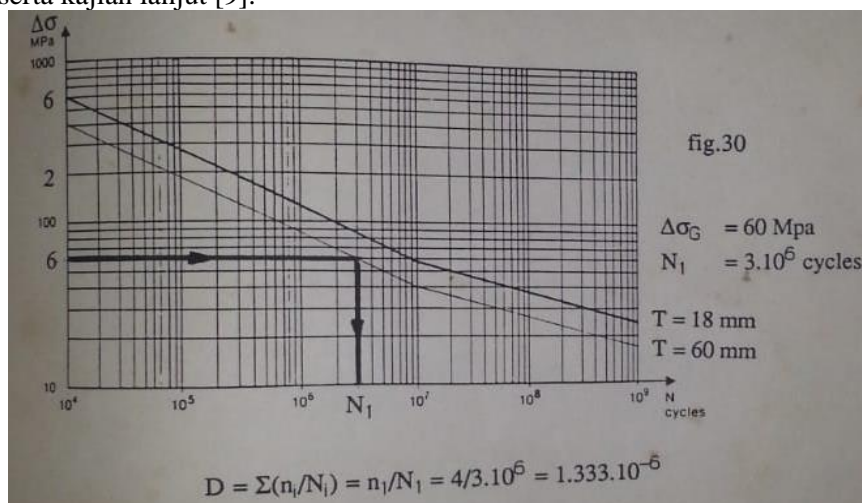


Gambar 14. Distribusi tegangan berdasarkan titik kritis

### 3.3. Kelelahan/ fatigue [9]

Perhitungan umur kelelahan/ fatigue struktur sendi las dilakukan dengan memasukkan harga tegangan yang diperoleh dari analisa "tegangan titik kritis" kedalam kurva wohler (kurva S-N).

Hasil perhitungan pendekatan tegangan titik kritis ini yang dimodelisasi/ disimulasikan dengan methoda elemen hingga (software CASTOR-SD) memberikan variasi sebesar 15 - 20% dari hasil yang ada di lapangan/ eksperimental. Adanya perbedaan dikarenakan penyederhanaan model yang perlu dievaluasi ulang, namun hasil pemodelan ini dapat dijadikan acuan untuk penelitian serta kajian lanjut [9].



Gambar 15. Grafik pendekatan perhitungan dengan CASTOR-SD

---

SIMPULAN

Dalam artikel ini, telah dijelaskan beberapa pendekatan analisa tegangan dengan contoh aplikasinya, serta pentingnya pemodelan elemen hingga yang tepat.

Pemodelan sendi struktur las (*T-joint*) dengan methoda elemen hingga dilakukan dengan pemilihan analisa tegangan ktitis. Hasil dari analisa kemudian diplot dalam kurva wohler (kurva S-N) untuk mendapatkan umur/ siklus kelelahan dari struktur sendi tersebut. Pemodelan merupakan masalah kritikal dalam perancangan struktur. Pemodelan/ analisa yang tepat dalam tahap desain merupakan persyaratan utama sebelum masuk ke fabrikasi.

## SARAN

Dapat dicoba metode lainnya sehingga variasi dapat kurang dari 15%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1].Institut international de la soudure, 1967, *Les ruptures par fatigue dans les constructions soudees*, vol 1, Paris, France
- [2].J.L Batoz, G. Dhatt, 1990, *Modélisation Des Structures Par Eléments Finis*, Volume 1 : Solides Elastiques, Hermès Sciences Publication, France
- [3]. P.G. Ciarlet, 1990, *Finite elements methodes*, Elsevier science, Netherlands
- [4].ECCS, 1985, *Recommendations for the fatigue design of steel strucures*, European Convention for Constructional Steelwork, Technical Comittee 6 – fatigue
- [5].X.Niu and G.Glinka, 1987, *The weld profile effect on stress intensity factors in weldments*, International journal of fracture, vol.35, no.1, UK
- [6].J.Lu et J.F.Flavenot, 1988, *Relaxation des contraintes residuelles sous chargement cyclique*, memoire et etudes scientifiques revue de metallurgie, Novembre, France
- [7].Erkki Niemi, 1991, *Stress calculation for fatigue analysis of welded components*, University of Technology Lappeenranta, Finland
- [8].Kentaro Yamada and Manfred A.Hirt, 1982, *Fatigue crack propagation from fillet weld toes*, Journal of the structural division vol.108, No.ST7, July, USA
- [9].Hery Sunarsono, 1991, *Calcul par la methode des elements finis et analyse a la fatigue conception integree*, Tesis, Departement Structure - Supmeca/ ISMCM, Paris, France