

# ANALISIS KEGAGALAN *JOINT PUNCHING SHEAR* PADA SAMBUNGAN TUBULAR DENGAN BANTUAN PERANGKAT LUNAK ELEMEN HINGGA

Harits Fathin<sup>1</sup> dan Prof. Dr. Ir. Ricky Lukman Tawekal<sup>2</sup>

*Program Studi Sarjana Teknik Kelautan, FTSL, ITB*

[harits.fathin@students.itb.ac.id](mailto:harits.fathin@students.itb.ac.id)

## ABSTRAK

Analisis kegagalan *joint punching shear* dengan bantuan perangkat lunak elemen hingga dilakukan untuk mengetahui kegagalan sambungan antara *brace member* dengan *chord member*. Kegagalan pada sambungan yang dapat terjadi adalah *buckling* pada *chord member*. *Buckling* pada sambungan dapat terjadi karena adanya *joint punching shear* yang terlalu besar hingga melewati kapasitas beban yang dapat diterima oleh sambungan. Dalam panduan API RP 2A, terdapat persamaan yang memberikan nilai izin beban yang bekerja pada sambungan. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kegagalan yang terjadi dengan cara melihat hasil kurva beban-deformasi pada sambungan. Kegagalan dalam simulasi dianggap telah terjadi ketika beban yang bekerja pada sambungan terhadap hasil deformasi sudah tidak berubah secara linear. Dalam pemodelan menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga, pemodelan dilakukan dengan menentukan properti sambungan, spesifikasi sambungan, kondisi batas, ukuran *meshing*, dan pengaplikasian beban terhadap objek pemodelan. Hasil pemodelan nantinya akan dibandingkan dengan nilai izin yang didapatkan dari panduan API RP 2A. Pada hasil simulasi, ditemukan bahwa model sambungan belum mengalami kegagalan saat diberikan beban sebesar 1 kali nilai izin dari API RP 2A. Kegagalan mulai terjadi setelah pemberian beban sebesar 1.5 kali nilai izin untuk beban momen *in-plane*, 3 kali nilai izin untuk beban aksial, dan 2.3 kali nilai izin untuk beban momen *out-of-plane*.

**Kata kunci:** sambungan, kegagalan, nilai izin, *brace member*, *chord member*

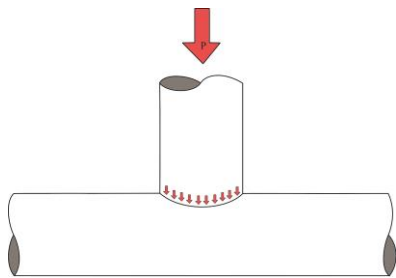
---

<sup>1</sup> Mahasiswa Tugas Akhir

<sup>2</sup> Dosen Pembimbing Tugas Akhir

## PENDAHULUAN

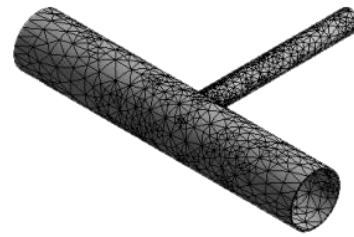
Salah satu fenomena yang terjadi pada sambungan diantara *chord member* dan *brace member* adalah kegagalan pada sambungan. Kegagalan pada sambungan yang dapat terjadi adalah *buckling* pada *chord member*. *Buckling* pada sambungan dapat terjadi karena adanya *joint punching shear* (dapat dilihat pada Gambar 1) yang terlalu besar hingga melewati kapasitas beban yang dapat diterima oleh sambungan. Konsentrasi tegangan terjadi pada bagian sambungan dan dapat menimbulkan kegagalan. Dalam panduan API RP 2A, terdapat persamaan yang memberikan nilai izin beban yang bekerja pada sambungan.



Gambar 1 Ilustrasi *Joint Punching Shear*

Pemodelan untuk menganalisa kegagalan sambungan menggunakan perangkat lunak dengan metode elemen hingga dikarenakan dalam proses penyelesaian yang dilakukan, model akan didiskritkan dimana proses pemodelan dari struktur/objek dengan membaginya dalam elemen-elemen kecil (*finite element* atau elemen hingga), untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2. Elemen-elemen

kecil terhubung oleh titik-titik (*nodes*) sehingga dapat digunakan untuk pemodelan dan sebagai batas dari struktur/objek. Dalam metode elemen hingga persamaan dari seluruh sistem dibentuk dari penggabungan persamaan elemen-elemennya.



Gambar 2 Ilustrasi pembagian elemen-elemen pada model

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan analisis kegagalan *joint punching shear* dengan bantuan perangkat lunak elemen hingga. Analisis ini dilakukan untuk memperlihatkan kegagalan yang terjadi dengan gambaran lebih detail dengan memperlihatkan *timestep* beban dan deformasi yang terjadi pada sambungan.

## TEORI DAN METODOLOGI

Baja merupakan material utama dalam struktur *jacket*. Jenis material baja yang umum digunakan untuk struktur *jacket* adalah jenis tubular. Baja struktural terdiri dari campuran besi (hingga 95%) dan karbon (0.15%-0.30%) yang difabrikasi dalam berbagai bentuk dan ukuran standar.

Struktur baja yang sudah difabrikasi memiliki berbagai bentuk dan ukuran standar.

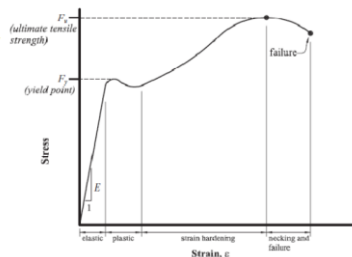
Karakteristik struktur baja yang digunakan dalam simulasi kegagalan pada sambungan sederhana sesuai dengan API RP 2A. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Pipa Baja Struktural

| Group | Class | Specification & Grade                    | Yield Strength |     | Tensile Strength |          |
|-------|-------|------------------------------------------|----------------|-----|------------------|----------|
|       |       |                                          | ksi            | MPa | ksi              | MPa      |
| I     | C     | API 5L Grade B*                          | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A53 Grade B                         | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A135 Grade B                        | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A139 Grade B                        | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A500 Grade A (round)                | 33             | 230 | 45 min.          | 310 min. |
|       |       | ASTM A501 (shaped)                       | 39             | 270 | 45 min.          | 310 min. |
| I     | B     | ASTM A106 Grade B (normalized)           | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A524 Grade I (through 3/8 in. w.L.) | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | Grade II (over 3/8 in. w.L.)             | 30             | 205 | 55–80            | 380–550  |
| I     | A     | ASTM A333 Grade 6                        | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | ASTM A334 Grade 6                        | 35             | 240 | 60 min.          | 415 min. |
| II    | C     | API 5L Grade X42 2% max. cold expansion  | 42             | 290 | 60 min.          | 415 min. |
|       |       | API 5L Grade X52 2% max. cold expansion  | 52             | 360 | 66 min.          | 455 min. |
|       |       | ASTM A500 Grade B (round)                | 42             | 290 | 58 min.          | 400 min. |
|       |       | (shaped)                                 | 46             | 320 | 58 min.          | 400 min. |
|       |       | ASTM A618                                | 50             | 345 | 70 min.          | 485 min. |
| II    | B     | API 5L Grade X52 with SR5 or SR6         | 52             | 360 | 66 min.          | 455 min. |
| II    | A     | See Section 8.2.2                        |                |     |                  |          |

\*Seamless or with longitudinal seam welds.

Struktur baja yang menerima beban akan mengalami tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Hubungan diantara tegangan dan regangan material tertentu biasa disebut dengan kurva tegangan-regangan material tertentu. Dapat dilihat contoh umum kurva tegangan-regangan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Ilustrasi Kurva Tegangan (*stress*) - Regangan (*strain*)

Dalam API RP 2A, nilai izin beban yang bekerja pada sambungan diatur dalam Persamaan (1) dan Persamaan (2).

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

Persamaan (1)

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

Persamaan (2)

Keterangan:

$P_a$  = Kapasitas yang diijinkan untuk beban axial *brace*.

$M_a$  = Kapasitas yang diijinkan untuk momen tekuk *brace*.

$F_{yc}$  = Tegangan leleh dari *member chord* pada sambungan ( atau 0.8 dari kekuatan tarik, jika kurang), ksi (MPa).

$FS$  = Faktor Keamanan = 1.60.

Untuk beban axial pada *brace* dengan klasifikasi yang merupakan campuran dari sambungan K, Y, dan X, ambil rata-rata nilai  $P_a$  berdasarkan porsi bagian dari total beban masing-masing klasifikasi.

$Q_u$  bervariasi dengan jenis sambungan dan beban, dalam API RP 2A dijelaskan untuk sambungan jenis T nilai  $Q_u$  terbagi menjadi tiga. Nilai  $Q_u$  yang pertama untuk beban aksial yang dapat dilihat pada Persamaan (3).

$$Q_u = 2.8 + (20 + 0.8\gamma)\beta^{1.6}$$

Persamaan (3)

Keterangan:

$$\gamma = D/2T$$

$$\beta = d/D$$

D = Diameter *chord member*

T = Tebal *chord member*

d = Diameter *brace member*

Namun nilai  $Q_u$  pada beban aksial tidak boleh melewati dari Persamaan (4).

$$Q_u \leq 2.8 + 36\beta^{1.6}$$

Persamaan (4)

Keterangan:

$$\beta = d/D$$

D = Diameter *chord member*

d = Diameter *brace member*

Nilai  $Q_u$  yang kedua untuk beban momen *in-plane* yang dapat dilihat pada Persamaan (5).

$$Q_u = (5 + 0.7\gamma)\beta^{1.2}$$

Persamaan (5)

Keterangan:

$$\gamma = D/2T$$

$$\beta = d/D$$

D = Diameter *chord member*

T = Tebal *chord member*

d = Diameter *brace member*

Nilai  $Q_u$  yang ketiga untuk beban momen *out-of-plane* yang dapat dilihat pada Persamaan (6).

$$Q_u = 2.5 + (4.5 + 0.2\gamma)\beta^{2.6}$$

Persamaan (6)

$$\gamma = D/2T$$

$$\beta = d/D$$

D = Diameter *chord member*

T = Tebal *chord member*

d = Diameter *brace member*

$Q_f$  adalah faktor untuk memperhitungkan beban nominal yang bekerja pada *chord*. API RP 2A memberikan nilai untuk  $Q_f$  seperti pada Persamaan (7).

$$Q_f = \left[ 1 + C_1 \left( \frac{FSP_c}{P_y} \right) - C_2 \left( \frac{FSM_{ipb}}{M_p} \right) - C_3 A^2 \right]$$

Persamaan (7)

Parameter A dijelaskan pada Persamaan 8):

$$A = \left[ \left( \frac{FSP_c}{P_y} \right)^2 + \left( \frac{FSM_c}{M_p} \right)^2 \right]^{0.5}$$

Persamaan 8

(FS=1.2 dalam Persamaan (7) dan Persamaan 8).)

$P_c$  dan  $M_c$  adalah resultan beban nominal aksial dan momen yang terjadi pada *chord*.  $P_y$  adalah kapasitas aksial leleh dari *chord*.  $M_p$  adalah kapasitas momen plastis dari *chord*, dan  $C_1$ ,  $C_2$ , dan  $C_3$  adalah koefisien yang bergantung pada jenis sambungan dan beban yang diberikan pada Tabel 2

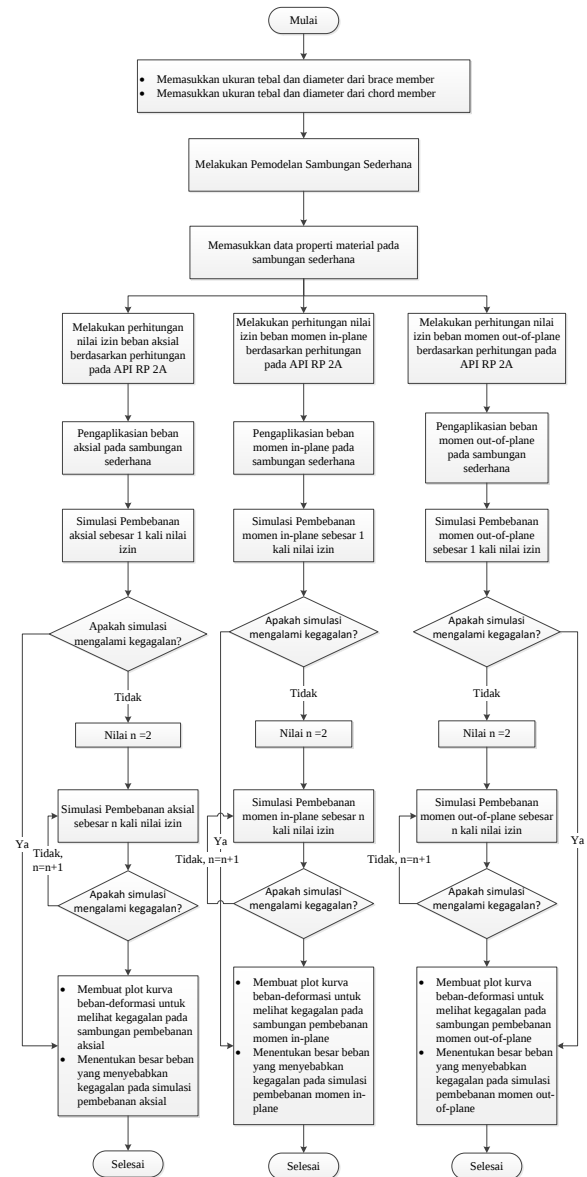
Tabel 2 Nilai Untuk C1, C2, C3

| Tipe Sambungan                                     | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> |
|----------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Sambungan K (brace menerima beban aksial)          | 0.2            | 0.2            | 0.3            |
| Sambungan T/Y (brace menerima beban aksial)        | 0.3            | 0              | 0.8            |
| Sambungan X (brace menerima beban aksial*)         |                |                |                |
| $\beta \leq 0.9$                                   | 0.2            | 0              | 0.5            |
| $\beta = 1$                                        | -0.2           | 0              | 0.2            |
| Semua jenis sambungan (brace menerima beban momen) | 0.2            | 0              | 0.4            |

\*Nilai diantara  $\beta = 0.9$  dan  $\beta = 1$  untuk sambungan X yang terkena beban aksial dapat dicari dengan interpolasi linear

Nilai rata-rata dari beban *chord* dan bending momen dari sisi yang lain sambungan *brace* juga harus diperhitungkan menggunakan Persamaan (7) dan Persamaan 8). Beban tarik aksial pada *chord* memiliki nilai positif. Beban momen tekuk in-plane pada *chord* memiliki nilai positif jika menghasilkan tekanan terhadap ujung sambungan. Penebalan pada *chord* yang berada di sambungan harus menggunakan perhitungan yang ada di atas.

Analisis kegagalan *joint punching shear* dilakukan dengan metodologi seperti pada Gambar 4 berikut



Gambar 4 Metodologi pengerjaan

Metode Elemen Hingga (FEM) atau biasanya disebut Analisis Elemen Hingga (FEA), adalah prosedur numerik yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti analisa tegangan pada struktur, perpindahan panas, elektromagnetik, dan aliran fluida.

Metode ini digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *exact solution/analytical solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari *FEM* adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*.

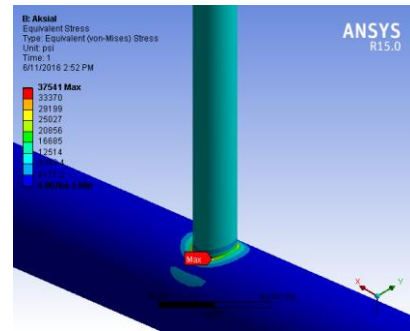
## HASIL DAN ANALISIS

Simulasi pembebanan sebesar 1 kali nilai izin telah dilakukan. Hasil simulasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.

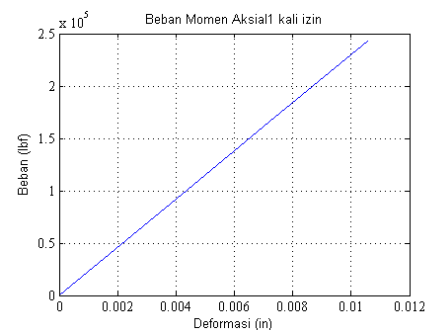
Tabel 3 Hasil Pembebanan 1 Kali Nilai Izin

| Hasil Pembebanan 1 Kali Nilai Izin |                    |                   |        |                        |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|--------|------------------------|
| No.                                | Jenis Beban        | Tegangan Maksimal | Satuan | Keterangan             |
| 1                                  | Aksial             | 37,541.00         | psi    | Terjadi pada sambungan |
| 2                                  | Momen In-Plane     | 40,901.00         | psi    |                        |
| 3                                  | Momen Out-of-Plane | 39,687.00         | psi    |                        |

Dapat dilihat dari pemberian beban aksial sebesar 1 kali nilai izin. Dengan menggunakan persamaan yang berada dalam API RP 2A, beban aksial yang diberikan sebesar 242.730 lbf. Tegangan yang terjadi pada sambungan sebesar 37.541 psi. Jika dilihat deformasi yang terjadi pada sambungan, dapat dilihat pada Gambar 6.



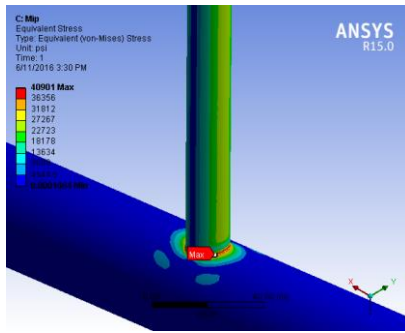
Gambar 5 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 1 Kali Nilai Izin Aksial



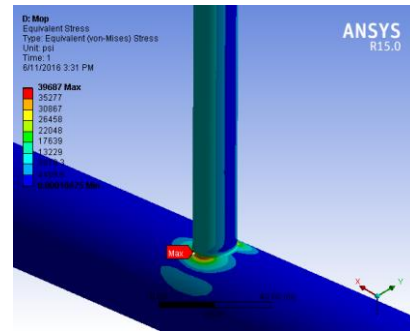
Gambar 6 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Aksial 1 Kali Izin

Kurva pemberian beban aksial terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan masih memperlihatkan perubahan linear. Sambungan belum memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 1 kali nilai izin beban aksial.

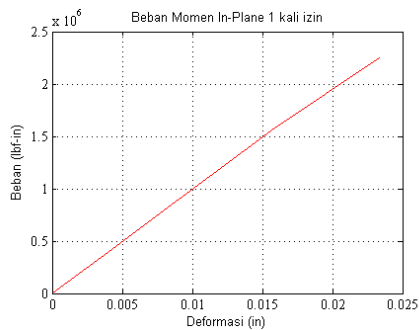
Pemberian beban momen *in-plane* sebesar 2.252.095,596 lbf-in. Tegangan yang terjadi pada sambungan sebesar 40.901 psi. Jika dilihat deformasi yang terjadi pada sambungan, dapat dilihat pada Gambar 8.



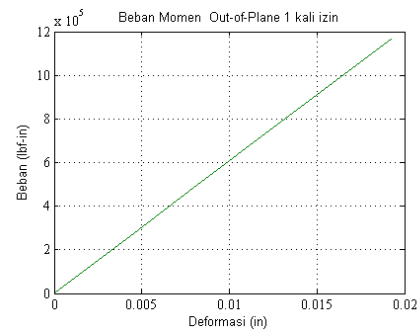
Gambar 7 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 1 Kali Nilai Izin Momen *In-Plane*



Gambar 9 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 1 Kali Nilai Izin Momen *Out-of-Plane*



Gambar 8 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Momen *In-Plane* 1 Kali Izin



Gambar 10 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Momen *Out-of-Plane* 1 Kali Izin

Kurva pemberian beban momen *in-plane* terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan masih memperlihatkan perubahan linear. Sambungan belum memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 1 kali nilai izin beban momen *in-plane*.

Pemberian beban momen *out-of-plane* sebesar 1.168.086,46 lbf-in. Tegangan yang terjadi pada sambungan sebesar 39.687 psi. Jika dilihat deformasi yang terjadi pada sambungan, dapat dilihat pada Gambar 10.

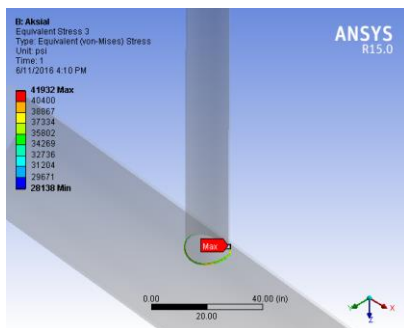
Kurva pemberian beban momen *out-of-plane* terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan masih memperlihatkan perubahan linear. Sambungan belum memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 1 kali nilai izin beban momen *out-of-plane*.

Pada simulasi selanjutnya, beban yang diberikan sebesar  $n$  kali nilai izin. Dari hasil simulasi memperlihatkan, jenis pembebanan yang berbeda memerlukan faktor pengali  $n$  yang berbeda untuk mencapai kegagalan pada sambungan. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.

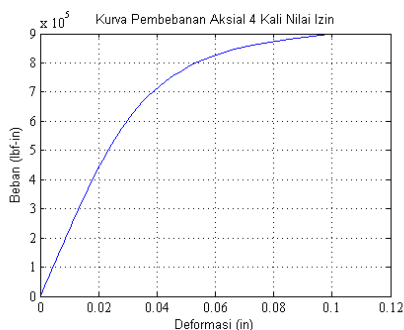
Tabel 4 Hasil Pembebanan n Kali Nilai Izin

| Hasil Pembebanan n Kali Nilai Izin |                    |                |                   |        |                        |
|------------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|--------|------------------------|
| No.                                | Jenis Beban        | n x nilai izin | Tegangan Maksimal | Satuan | Keterangan             |
| 1                                  | Aksial             | 4              | 41,932.00         | psi    | Terjadi pada sambungan |
| 2                                  | Momen In-Plane     | 3              | 99,950.00         | psi    |                        |
| 3                                  | Momen Out-of-Plane | 4              | 53,582.00         | psi    |                        |

Dapat dilihat dalam Tabel 4, untuk jenis pembebanan aksial, diperlukan 4 kali nilai izin untuk mencapai kegagalan. Untuk mengetahui beban pasti yang mulai memberikan kegagalan pada sambungan perlu dilihat pada Gambar 12.



Gambar 11 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 4 Kali Nilai Izin Aksial



Gambar 12 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Aksial 4 Kali Izin

Kurva pemberian beban aksial terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan telah memperlihatkan perubahan non-linear. Sambungan telah memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 4 kali nilai izin beban aksial. Dapat dilihat pada Gambar 12, setelah deformasi melewati 0.04 in, kurva mulai menunjukkan perubahan non-linear. Berarti pada pembebanan sebesar 720.000 lbf, sambungan mulai mengalami kegagalan. Jadi *Safety Factor* untuk pembebanan aksial adalah sebesar

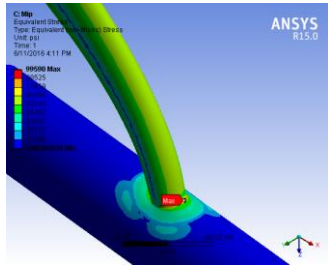
$$SF = \frac{Beban_{max}}{Beban_{izin}}$$

$$SF = \frac{720.000}{242.730}$$

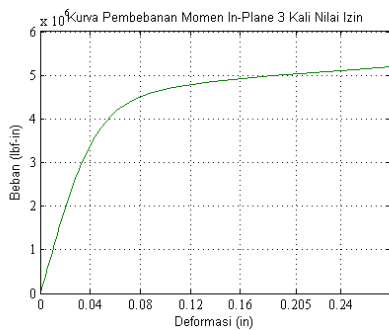
$$SF = 2.96$$

Persamaan API RP 2A untuk nilai izin beban aksial memiliki SF sebesar 2.96. Jadi, Kegagalan mulai terjadi setelah pemberian beban sebesar 2.96 kali nilai izin untuk beban aksial

untuk jenis pembebanan momen *in-plane*, diperlukan 3 kali nilai izin untuk mencapai kegagalan. Untuk mengetahui beban pasti yang mulai memberikan kegagalan pada sambungan perlu dilihat pada Gambar 14.



Gambar 13 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 3 Kali Nilai Izin Momen *In-Plane*



Gambar 14 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Momen *In-Plane* 3 Kali Izin

Kurva pemberian beban momen *in-plane* terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan telah memperlihatkan perubahan non-linear. Sambungan telah memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 3 kali nilai izin beban aksial. Dapat dilihat pada Gambar 14, setelah deformasi melewati 0.04 in, kurva mulai menunjukkan perubahan non-linear. Berarti pada pembebanan sebesar 3.378.100 lbf-in, sambungan mulai mengalami kegagalan. Jadi *Safety Factor* untuk pembebanan aksial adalah sebesar

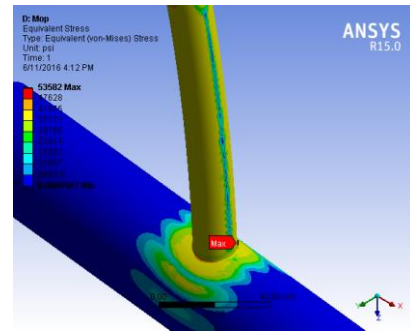
$$SF = \frac{Beban_{max}}{Beban_{izin}}$$

$$SF = \frac{3.378.100}{2.252.095}$$

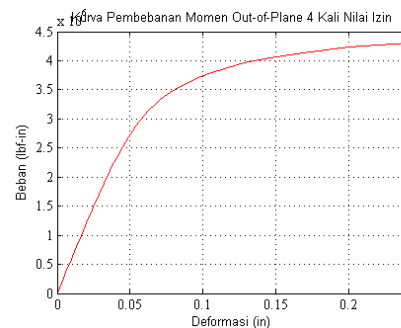
$$SF = 1.49$$

Persamaan API RP 2A untuk nilai izin beban momen *in-plane* memiliki SF sebesar 1.49. Jadi, Kegagalan mulai terjadi setelah pemberian beban sebesar 1.49 kali nilai izin untuk beban momen *in-plane*.

untuk jenis pembebanan momen *out-of-plane*, diperlukan 4 kali nilai izin untuk mencapai kegagalan. Untuk mengetahui beban pasti yang mulai memberikan kegagalan pada sambungan perlu dilihat pada Gambar 16.



Gambar 15 Hasil Tegangan Akibat Pemberian Beban 4 Kali Nilai Izin Momen *Out-of-Plane*



Gambar 16 Kurva Pembebanan-Deformasi Beban Momen *Out-of-Plane* 4 Kali Izin

Kurva pemberian beban momen *out-of-plane* terhadap deformasi yang terjadi pada sambungan telah memperlihatkan perubahan non-linear. Sambungan telah memperlihatkan kegagalan pada pemberian beban sebesar 3 kali nilai izin beban aksial. Dapat dilihat pada Gambar 16, setelah deformasi melewati 0.05 in, kurva mulai menunjukkan perubahan non-linear. Berarti pada pembebanan sebesar 2.700.000 lbf-in, sambungan mulai mengalami kegagalan. Jadi *Safety Factor* untuk pembebanan aksial adalah sebesar

$$SF = \frac{Beban_{max}}{Beban_{izin}}$$

$$SF = \frac{2.700.000}{1.168.086}$$

$$SF = 2.31$$

Persamaan API RP 2A untuk nilai izin beban momen *out-of-plane* memiliki SF sebesar 2.31. Jadi, Kegagalan mulai terjadi setelah pemberian beban sebesar 2.31 kali nilai izin untuk beban momen *out-of-plane*.

## SIMPULAN DAN SARAN

Pada pembahasan Tugas Akhir kali ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kegagalan pada sambungan sederhana belum terjadi saat pemberian beban sebesar 1 kali nilai izin API RP 2A. Untuk pembebanan aksial, nilai izin dari API RP 2A memiliki SF sebesar 3 terhadap nilai beban yang mulai menunjukkan kegagalan. Sementara untuk

pembebanan momen *in-plane*, nilai izin dari API RP 2A memiliki SF sebesar 1,5 terhadap nilai beban yang menunjukkan kegagalan. Untuk pembebanan momen *out-of-plane*, nilai izin dari API RP 2A memiliki SF sebesar 2,3 terhadap nilai beban yang menunjukkan kegagalan.

2. Berdasarkan nilai izin dari perhitungan API RP 2A, simulasi kegagalan *joint punching shear* pada model sambungan sederhana belum menghasilkan kegagalan.

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, terdapat satu saran yaitu:

1. Pemodelan dengan jenis material yang berbeda diantara chord member, brace member, dan pada sambungan belum dapat dilakukan. Diharapkan dengan memberikan jenis material yang sesuai akan mendapatkan hasil pemodelan yang lebih baik.
2. Pemodelan dengan sambungan tubular jenis X atau Y dapat dilakukan. Diharapkan dengan melakukan pemodelan jenis X atau Y dapat melihat kegagalan pada sambungan di bagian *jacket* yang lebih kompleks.

## DAFTAR PUSTAKA

**American Petroleum Institute.** 2007. Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixes Offshpre Platform API RP2A-WSD 21ST Edition. API Publishing Services, Washington D.C., United States of America

**Moaveni, Saeed.** 1999. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America

**R. C. Hibbeler.** 2013. Mechanics of Materials. 9th edition Pearson Prentice Hall, Pearson Prentice Hall, United States of America