

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

4.1.1 Kondisi Operasional Instalasi *Feed Water Heater Cold Reheat Spray Water (FW-130)*

Kondisi operasional berupa tekanan, temperatur dan debit aliran tercatat melalui alat yang terpasang pada instalasi. Letak alat pengukur pada instalasi dapat dilihat pada Lampiran 3. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 25 Juni 2014 pukul 03.13 sampai dengan 26 Juni 2014 pukul 15.13 selama 36 jam. Data operasional berupa tekanan, temperatur dan debit dapat dilihat pada Lampiran 5. Nilai rata – rata dan maksimal pada data dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai Rata – rata dan Maksimal Data Operasional FW-130

	Maksimal	Rata - rata
Tekanan (kPa)	17693,50	17366,81
Temperatur (°C)	167,18	159,89
Debit (m ³ /jam)	53,40	-

4.1.2 Ketebalan Pipa Instalasi *Feed Water Heater Cold Reheat Spray Water (FW-130)*

Dari hasil survey di *department engineering* PLTU Unit 7, instalasi FW-130 tidak pernah dilakukan pengukuran ketebalan dinding pipa. Dikarenakan instalasi FW-130 merupakan instalasi *non-critical*. Dari hasil pengukuran ketebalan pipa di instalasi lainnya dengan kondisi fluida yang sama, ketebalan dinding pipa tidak mengalami penurunan. Hal ini disebabkan pH dari air dijaga pada kondisi basa $\pm 8,7\sim 8,9$, karena jika pH air dibawah batas tersebut maka PLTU Unit 7 akan mengalami *Trip (Shutdown)*. Ketebalan pipa Instalasi *Feed Water Heater Cold Reheat Spray Water (FW-130)* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Ketebalan Pipa FW-130

Komponen	Bahan	Tebal (mm)	Diameter Luar (mm)
Pipa Lurus	ASTM A106 Grade C	13,49	114,3
Pipa Bend	ASTM A234 WPC	13,49	114,3

4.2 Batas Tekanan Operasi yang Diizinkan

Perhitungan batas tekanan operasi ditujukan untuk mengetahui apakah tekanan operasional masih berada dibawah batas tekanan operasional yang diizinkan pada kondisi temperatur operasional. Pada perhitungan batas tekanan operasi yang diizinkan, telah ditetapkan temperatur $T = 160^{\circ}\text{C}$ berdasarkan kondisi operasional saat ini. $D = 114,3$ mm, $t_m = 13,49$ mm, $Y = 0,4$ (berdasarkan pada Tabel 2.2), $E = 1$ (pipa merupakan tipe *seamless*), material pipa lurus yaitu ASTM A106 Grade C dengan *Allowable Stress* sebesar 137895,14 kPa sedangkan material pipa bend yaitu ASTM A234 WPC dengan *Allowable Stress* sebesar 137895,14 kPa (Lampiran 2). Dan $I = 1$ didasarkan pada garis tengah pipa *bend (center line)*, karena t_m pipa lurus = t_m pipa *bend*.

1. Pipa Lurus

Berdasarkan Persamaan (2-1), maka tekanan operasional yang diizinkan pada pipa lurus yaitu

$$\begin{aligned}
 t_m &= \frac{PD}{2(SE + PY)} \\
 P &= \frac{SE}{\left(\frac{D}{2t_m} - Y\right)} \\
 P &= \frac{137895,14.1}{\left(\frac{114,3}{2.13,49} - 0,4\right)} \\
 P &= 35943,22 \text{ kPa}
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

Berdasarkan ASME 31.1 untuk pipa pada kondisi kerja 160°C , tipe *seamless*, dan material yang digunakan ASTM A106 Grade C dengan $S = 137895,14$ kPa tekanan operasional yang diizinkan pada pipa lurus sebesar 35943,22 kPa.

2. Pipa Bend

Berdasarkan Persamaan (2-3), maka tekanan operasional yang diizinkan pada pipa *bend* yaitu

$$\begin{aligned}
 t_m &= \frac{PD}{2(SE/I + PY)} \\
 P &= \frac{SE}{1. \left(\frac{D}{2t_m} - Y\right)} \\
 P &= \frac{137895,14.1}{1. \left(\frac{114,3}{2.13,49} - 0,4\right)}
 \end{aligned}$$

$$P = 35943,22 \text{ kPa} \quad (4-2)$$

Berdasarkan ASME 31.1 untuk pipa pada kondisi kerja 160°C , tipe *seamless*, dan material yang digunakan ASTM A234 WPC dengan $S = 137895,14 \text{ kPa}$ tekanan operasional yang diizinkan pada pipa *bend* sebesar $35943,22 \text{ kPa}$.

4.3 Pemodelan Instalasi FW – 130

Berdasarkan kondisi operasional yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan *saturated water – temperature table* pada Lampiran 6. Maka air yang terdapat didalam pipa pada temperatur 160°C memiliki massa jenis sebesar $907,44 \text{ kg/m}^3$. Sedangkan untuk pembungkus pipa (isolasi) dengan bahan wool memiliki tebal 76 mm dan massa jenis sebesar $96,11 \text{ kg/m}^3$.

Terdapat empat pemodelan instalasi FW – 130 yaitu dengan melakukan perubahan ketebalan pipa sesuai dengan variabel bebas yang telah ditentukan dan perubahan penyangga pipa pada daerah yang mengalami kerusakan sesuai dengan variabel terikat yang telah ditentukan. Variasi pemodelan dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Variasi Pemodelan pada *Software*

Model	t_m mm	P kPa	T $^{\circ}\text{C}$	ρ Pipa kg/m ³	ρ Air kg/m ³	ρ Isolasi Pipa kg/m ³	Perubahan Penyangga
1	13,49	17366,81	160	7850	907,44	96,11	-
2	13,49	17366,81	160	7850	907,44	96,11	Ada
3	11,12	17366,81	160	7850	907,44	96,11	Ada
4	8,56	17366,81	160	7850	907,44	96,11	Ada

Model 1 merupakan pemodelan sesuai dengan desain asli instalasi saat ini. Model 2 terdapat perubahan jenis penyangga pipa dengan ketebalan sesuai dengan desain asli. Sedangkan Model 3 dan 4 terdapat perubahan tebal dinding pipa dan jenis penyangga pipa. Pemodelan simulasi instalasi FW-130 pada *software* berbasis elemen hingga dapat dilihat pada Lampiran 7.

4.4 Contoh Perhitungan Tegangan dan *Displacement*

Dalam contoh perhitungan menggunakan Model 1 dan hanya menerangkan pada elemen antara titik 10-20. Karena untuk menghitung elemen lainnya menggunakan metode yang sama.

4.4.1 Beban Tetap (*Sustained Load*)

Dengan memasukkan data berdasarkan Model 1. Massa untuk 1 meter pipa yang terdiri dari pipa, air dan isolasi yaitu

➤ Pipa

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Luas penampang pipa

$$A = \frac{\pi \cdot (114,3^2 - 87,32^2)}{4}$$

$$A = 4,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4-3)$$

Massa pipa per meter

$$M = \rho \cdot A$$

$$M = 7850 \cdot 4,27 \cdot 10^{-3}$$

$$M = 33,54 \text{ kg/m} \quad (4-4)$$

➤ Air

$$\rho = 907,44 \text{ kg/m}^3$$

Volume air per meter

$$A = \pi \cdot R_i^2$$

$$A = \pi \cdot 43,66^2$$

$$A = 5,99 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4-5)$$

Massa air per meter

$$M = \rho \cdot A$$

$$M = 907,44 \cdot 5,99 \cdot 10^{-3}$$

$$M = 5,43 \text{ kg/m} \quad (4-6)$$

➤ Isolasi

$$\rho = 96,11 \text{ kg/m}^3$$

Volume isolasi per meter

$$V = \frac{\pi \cdot (190,3^2 - 114,3^2)}{4}$$

$$V = 0,02 \text{ m}^2 \quad (4-7)$$

Massa isolasi per meter

$$M = \rho \cdot A$$

$$M = 96,11 \cdot 0,02$$

$$M = 1,92 \text{ kg/m} \quad (4-8)$$



- Massa total

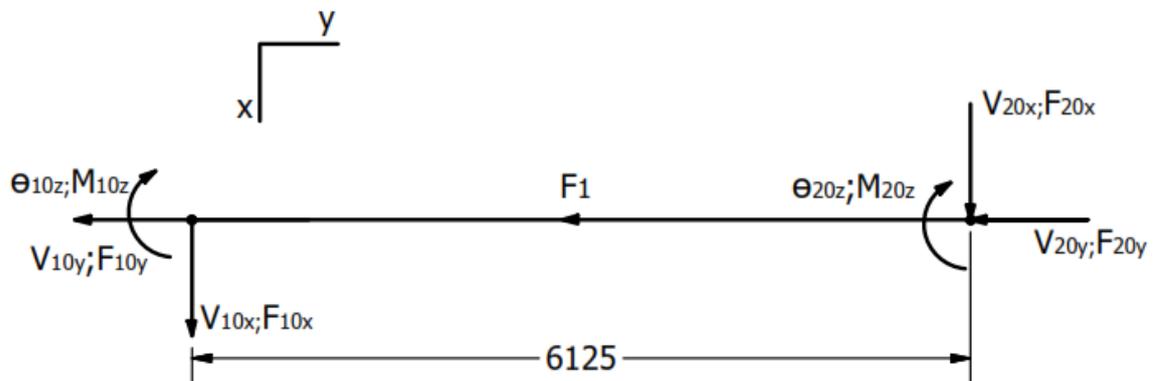
$$M = 33,54 + 5,43 + 1,92$$

$$M = 40,89 \text{ kg/m} \quad (4-9)$$

- Berat total

$$W = 40,65.9,81$$

$$W = 398,78 \text{ N/m} \quad (4-10)$$



Gambar 4.1 Model Elemen Titik 10–20

Pada Lampiran 3 dapat dilihat bahwa panjang pipa antara titik 10 sampai dengan 20 sebesar 6125 mm. Dengan menggunakan Persamaan (4-10) berat pipa antara titik 10 sampai dengan 20 sebesar

$$F_1 = W \cdot y$$

$$F_1 = 398,78.6,125$$

$$F_1 = 2598 \text{ N} \quad (4-11)$$

Dari elemen titik 10-20 dengan F_1 berada pada tengah batang yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 bentuk persamaan matriks sesuai dengan Persamaan (2-42).

$$\{D\} = [k]^{-1}\{F - f\}$$

$$\{F - f\} = [k] \cdot \{D\} \quad (4-12)$$

Matriks k sesuai dengan Persamaan (2-47), matriks $\{F\}$ dan $\{f\}$ sesuai dengan arah pada Gambar 4.1. Sehingga bentuk persamaan matriks perpindahan untuk elemen titik 10-20 dapat dilihat pada Persamaan (4-13).

$$\begin{Bmatrix} F_{10y} \\ F_{10x} \\ M_{10z} \\ F_{20y} \\ F_{20x} \\ M_{20z} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{10y} \\ f_{10x} \\ m_{10z} \\ f_{20y} \\ f_{20x} \\ m_{20z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} V_{10y} \\ V_{10x} \\ \theta_{10z} \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{Bmatrix} \quad (4-13)$$

Besar komponen pada matriks {f} dapat dicari dengan menggunakan Lampiran 8; L = 6125 mm; E = 1,94.10⁸ N/mm²; A = 4272 mm²; I = 96666 mm⁴.

$$\begin{Bmatrix} 1299 \\ 0 \\ 0 \\ 1299 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1,94 \cdot 10^8 \cdot 4272}{6125} & 0 & 0 & -\frac{1,94 \cdot 10^8 \cdot 4272}{6125} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^3} & \frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & 0 & -\frac{12 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^3} & \frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & \frac{4 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125} & 0 & -\frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & \frac{2 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125} \\ -\frac{1,94 \cdot 10^8 \cdot 4272}{6125} & 0 & 0 & \frac{1,94 \cdot 10^8 \cdot 4272}{6125} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^3} & -\frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & 0 & \frac{12 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^3} & -\frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & \frac{2 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125} & 0 & -\frac{6 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125^2} & \frac{4 \cdot 1,94 \cdot 10^8 \cdot 96666}{6125} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{Bmatrix} \quad (4-14)$$

SIMETRI

Besar reaksi ujung batang dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-43)

$$\{F_M\} = \{F_{ML}\} + [F_{MD}] \cdot \{D\}$$

Besar komponen pada matriks {F_{ML}} dan [F_{MD}] dapat dicari dengan menggunakan Lampiran 8 sehingga persamaan matriksnya menjadi



$$\begin{bmatrix} F_{M10y} \\ F_{M10x} \\ M_{M10z} \\ F_{M10y} \\ F_{M10x} \\ M_{M10z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10y} \\ V_{10x} \\ \theta_{10z} \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

Besar momen reaksi dan gaya reaksi telah didapatkan, maka tegangan dapat dihitung.

1. Tegangan Akibat Tekanan (*Pressure Stress*)

Tegangan akibat tekanan Persamaan (2-7).

$$\sigma_L = \frac{17366,81 \cdot 87,32^2}{4.100,81 \cdot 13,49}$$

$$\sigma_L = 24342,88 \text{ kPa} \quad (4-16)$$

2. Tegangan Akibat Momen Bending (*Bending Stress*)

Tegangan akibat momen bending pada titik 10 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-9).

$$\sigma_{Lz} = \frac{M_{R10z} \cdot 57,15}{\frac{\pi \cdot (114,3^4 - 87,32^4)}{64}}$$

$$\sigma_{Lz} = \frac{M_{R10z}}{96666} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Lx} = \frac{M_{R10x} \cdot 57,15}{\frac{\pi \cdot (114,3^4 - 87,32^4)}{64}}$$

$$\sigma_{Lx} = \frac{M_{R10x}}{96666} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{LBending} = \sqrt{\sigma_{Lx}^2 + \sigma_{Lz}^2} \quad (4-17)$$

3. Tegangan Tangensial (*Hoop Strees*)

Tegangan tangensial pada titik 10 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-11) dan tegangan yang dihitung pada jari – jari terluar pipa, maka

$$\sigma_t = \frac{17366,81 \cdot \left(43,66^2 + \frac{43,66^2 \cdot 57,15^2}{57,15^2} \right)}{(57,15^2 - 43,66^2)}$$

$$\sigma_t = 48685,76 \text{ kPa} \quad (4-18)$$

4. Tegangan Geser

Tegangan akibat momen bending pada titik 10 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-13).

$$\tau = \frac{M_t}{2.Z}$$

$$\tau = \frac{M_t}{2.9666} \quad (4-19)$$

5. Tegangan Kode

Tegangan kode pada titik 10 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-15).

$$\sigma_L = 24342,88 + 1000 \cdot \sqrt{\sigma_{LBending}^2 + 4 \cdot \tau^2} \text{ kPa} \quad (4-20)$$

4.4.2 Beban Ekspansi (*Expansion Load*)

Perhitungan tegangan longitudinal akibat beban ekspansi sama halnya dengan perhitungan akibat beban tetap yaitu mencari besar gaya reaksi dan momen reaksi terlebih dahulu. Pada permasalahan ini pipa memiliki temperatur sebesar 160°C (320°F). Sehingga bentuk persamaan matriks untuk mencari besar ekspansi titik 10-20 dapat dilihat pada Persamaan (4-21).

$$\begin{bmatrix} F_{10y} \\ F_{10x} \\ M_{10z} \\ F_{20y} \\ F_{20x} \\ M_{20z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{10y} \\ f_{10x} \\ m_{10z} \\ f_{20y} \\ f_{20x} \\ m_{20z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10y} \\ V_{10x} \\ \theta_{10z} \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

Besar komponen pada matriks {f} dapat dicari dengan menggunakan Lampiran 8; L = 6125 mm; E = 1,94.108 N/mm²; A = 4272 mm²; I = 96666 mm⁴; α = 7.10⁻⁶ mm/mm/°F.

$$\begin{bmatrix} EA\alpha\Delta T \\ 0 \\ 0 \\ EA\alpha\Delta T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10y} \\ V_{10x} \\ \theta_{10z} \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Besar reaksi ujung batang dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-43)

$$\{F_M\} = \{F_{ML}\} + [F_{MD}] \cdot \{D\}$$

$$\begin{bmatrix} F_{M10y} \\ F_{M10x} \\ M_{M10z} \\ F_{M10y} \\ F_{M10x} \\ M_{M10z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10y} \\ V_{10x} \\ \theta_{10z} \\ V_{20y} \\ V_{20x} \\ \theta_{20z} \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

Besar momen reaksi dan gaya reaksi telah didapatkan, maka tegangan dapat dihitung. Tegangan yang timbul akibat beban ekspansi adalah tegangan longitudinal. Tegangan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-17) dengan $i = 1$.

$$S_E = \frac{1000 \cdot i \cdot M_c}{z}$$

$$S_E = \frac{1000 \cdot 1 \cdot \sqrt{M_{R10x}^2 + M_{R10y}^2 + M_{R10z}^2} \cdot 57,15}{\frac{\pi \cdot (114,3^4 - 87,32^4)}{64}}$$

$$S_E = \frac{1000 \cdot \sqrt{M_{R10x}^2 + M_{R10y}^2 + M_{R10z}^2}}{96666} \text{ kPa} \quad (4-24)$$

Untuk menyelesaikan persamaan matriks yang terdapat pada subbab 4.4.1 dan 4.4.2 menggunakan *software* yang berbasis elemen hingga untuk membantu perhitungan. Karena persamaan matriks yang terbentuk bukan hanya pada elemen antara titik 10-20 namun pada elemen lainnya juga, dan antara elemen – elemen tersebut saling berkesinambungan.

4.5 Hasil Perhitungan Software

Hasil perhitungan tegangan dan ekspansi titik 140 sampai dengan titik 230 (merupakan daerah instalasi yang mengalami kerusakan) pada masing – masing model instalasi *Feed Water Heater Cold Reheat Spray Water* (FW-130) dengan menggunakan *software* dapat dilihat pada Lampiran 9. Dan skema hasil simulasi dengan menggunakan *software* dapat dilihat pada Lampiran 10.

4.6 Pembahasan

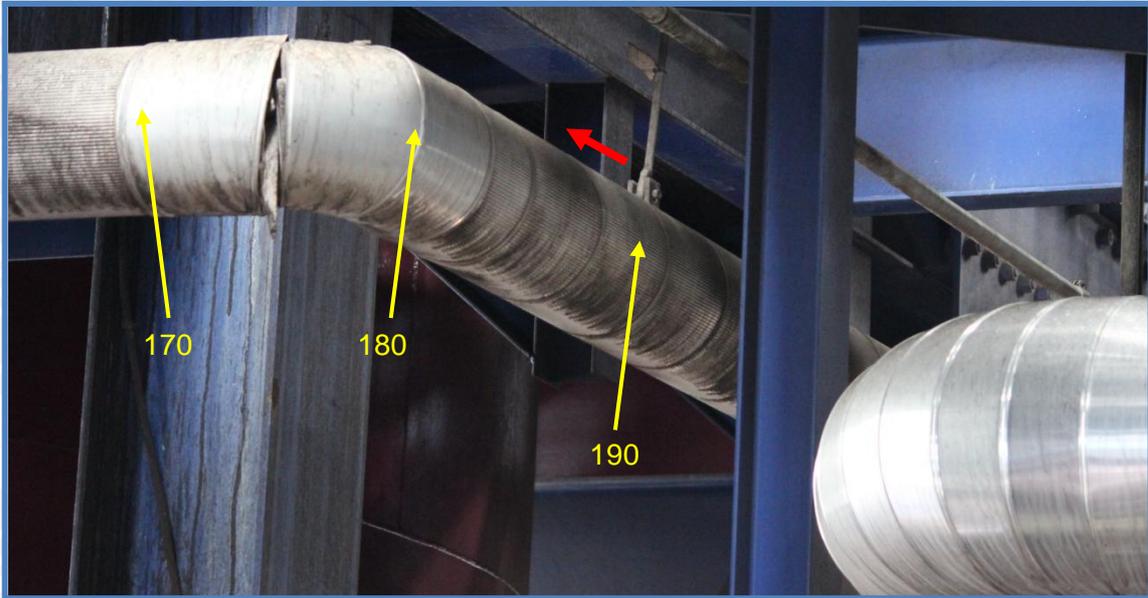
4.6.1 Analisa Penyebab Kerusakan Isolasi Pipa

Hasil perhitungan tekanan operasional pipa lurus dan pipa bend yang diizinkan ditunjukkan pada Persamaan (4-1) dan Persamaan (4-2) sebesar 35943,22 kPa. Sedangkan tekanan operasional sebesar 17366,81 kPa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tekanan operasional bukan penyebab kerusakan instalasi tersebut, karena masih jauh dibawah tekanan operasional yang diizinkan $17366,81 \text{ kPa} < 35943,22 \text{ kPa}$. Hasil perhitungan dengan menggunakan *software*, *displacement* Model 1 menunjukkan bahwa titik 170 dan titik 180 memiliki *displacement* terbesar pada instalasi FW-130 (lihat Lampiran 9). Pada titik 170 sebesar -31,53 mm sumbu z; -15,23 mm sumbu x; 2,52 mm sumbu y. Dan pada titik 180 sebesar -31,16 mm sumbu z; -14,14 mm sumbu x; 1,11 mm sumbu y. Skema hasil simulasi ekspansi pipa menggunakan *software* dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Skema Hasil Simulasi Ekspansi Pipa dengan Menggunakan *Software*

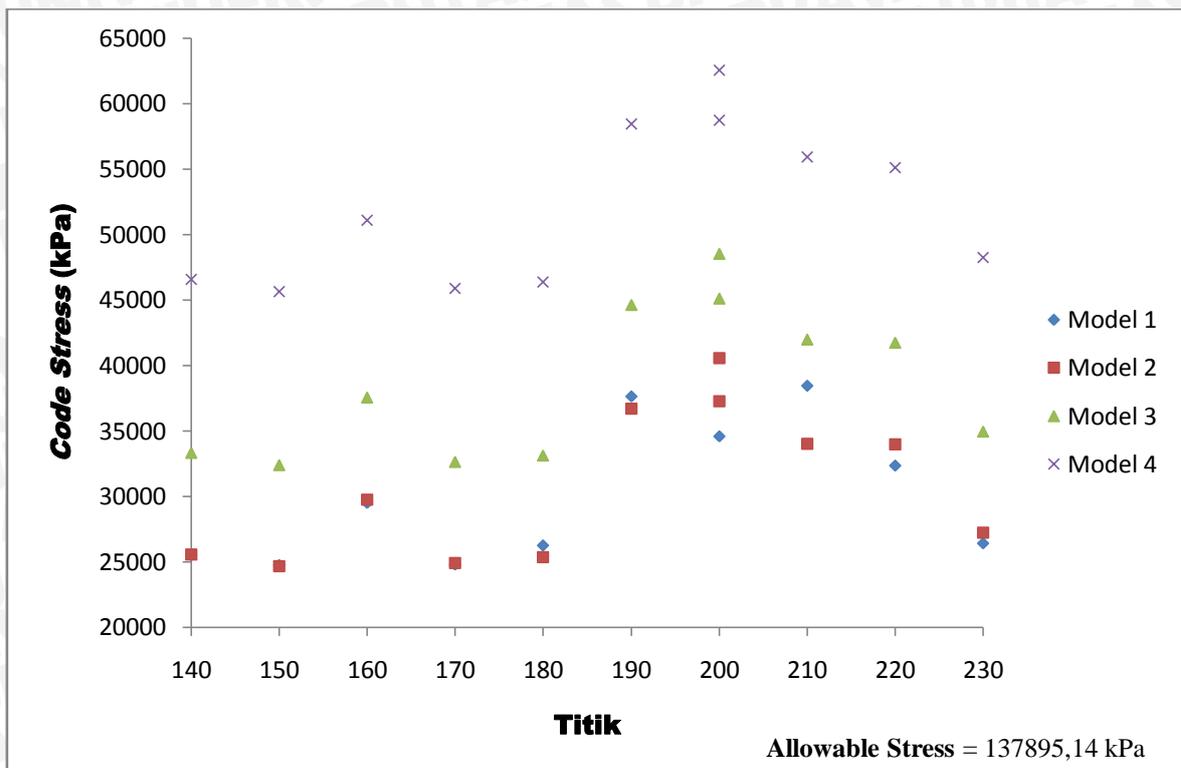
Dari *displacement* ketiga sumbu tersebut dapat dilihat *displacement* pada sumbu z terbesar. Dan skema hasil simulasi juga menunjukkan pergerakan pipa yang sesuai dengan kondisi aktualnya, dapat dilihat pada Gambar 4.3. Hal ini disebabkan antara titik 180 sampai dengan 230 tidak terdapat jenis penyangga pipa yang berfungsi untuk menahan *displacement* pipa antara titik 180 sampai dengan 230 (lihat Lampiran 11). Sehingga akibat *displacement* tersebut penutup isolasi pipa terbuka dan menyebabkan isolasi mengalami kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Kondisi Aktual Instalasi FW-130 Titik 170 dan 180

Hasil perhitungan tegangan dengan menggunakan *software* Model 1 titik 170 dan titik 180 pada Lampiran 9 menunjukkan pada titik 170 tegangan kode (*code stress*) akibat beban tetap (*sustained load*) sebesar 24781,29 kPa dengan tegangan izin (*allowable stress*) sebesar 137895,14 kPa, dan tegangan kode (*code stress*) akibat beban ekspansi (*expansion load*) sebesar 8484,10 kPa dengan tegangan izin (*allowable stress*) sebesar 206842,71 kPa. Sedangkan pada titik 180 tegangan kode (*code stress*) akibat beban tetap (*sustained load*) sebesar 26261,04 kPa dengan tegangan izin (*allowable stress*) sebesar 137895,14 kPa, dan tegangan kode (*code stress*) akibat beban ekspansi (*expansion load*) sebesar 8215,77 kPa dengan tegangan izin (*allowable stress*) sebesar 206842,71 kPa. Pada kedua titik yang mengalami kerusakan isolasi tersebut tegangan kode akibat beban tetap maupun beban ekspansi masih dibawah tegangan izin, sehingga pipa tidak terjadi kerusakan. Namun jika kondisi demikian dibiarkan dapat menyebabkan permukaan pipa pada bagian luar mengalami kerusakan karena korosi sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hariyotejo P. (2013).

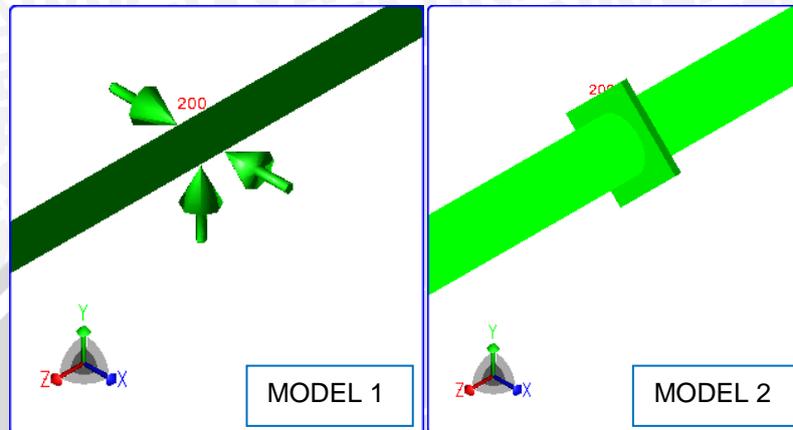
4.6.2 Analisa Code Stress Akibat Sustained Load



Gambar 4.4 Code Stress Akibat Sustained Load Masing – masing Model Antara Titik 140 – 230

Pada Gambar 4.4 antara titik 140 – 230 dapat dilihat bahwa terdapat perubahan *code stress* akibat perubahan penyangga pipa dengan ketebalan pipa yang sama (Model 1 dan Model 2). Pada beberapa titik dengan adanya perubahan penyangga pipa tegangan yang ditimbulkan semakin besar, namun pada titik lainnya tegangan mengalami penurunan. Pada Persamaan (2-10) dan Persamaan (2-13) *bending stress* dan *shear stress* dipengaruhi oleh momen *bending*, momen torsi dan *section modulus*. Pada kedua model tersebut besar *section modulus* sama, karena ketebalan dinding pipa sama besar. Namun besar momen resultan akibat *sustained load* pada kedua model tersebut berbeda (dapat dilihat pada Lampiran 9). Momen resultan merupakan momen reaksi pada pipa akibat pembebanan. Model 1 dan Model 2 memiliki beban, modulus elastisitas, momen inersia, luas penampang dan panjang setiap elemen pipa yang sama. Namun *displacement* kedua model ini berbeda (lihat Lampiran 9) karena Model 1 pada titik 200 jenis penyangga pipa merupakan jenis *pipe guide* yang berfungsi untuk mengarahkan pergerakan pipa, pada Gambar 4.5 dapat dilihat penyangga pada titik 200 memungkinkan pergerakan pipa pada arah sumbu z (+z dan -z), sumbu +y dan rotasi pada masing – masing sumbu. Sedangkan Model 2 pada titik 200 jenis penyangga pipa diganti dengan jenis *anchor* yang berfungsi untuk menahan pergerakan dan rotasi pipa pada masing – masing sumbu. Sesuai dengan

Persamaan (2-43) momen reaksi ini dipengaruhi oleh matriks reaksi pada ujung batang terkekang yang tidak dipengaruhi beban [FMD], matriks reaksi pada ujung batang terkekang yang dipengaruhi beban {FML} dan matriks perpindahan {D}. Perbedaan *displacement* inilah yang menyebabkan momen reaksi Model 1 dan Model 2 berbeda. Gambar 4.5 merupakan skema Model 1 dan Model 2 pada software.

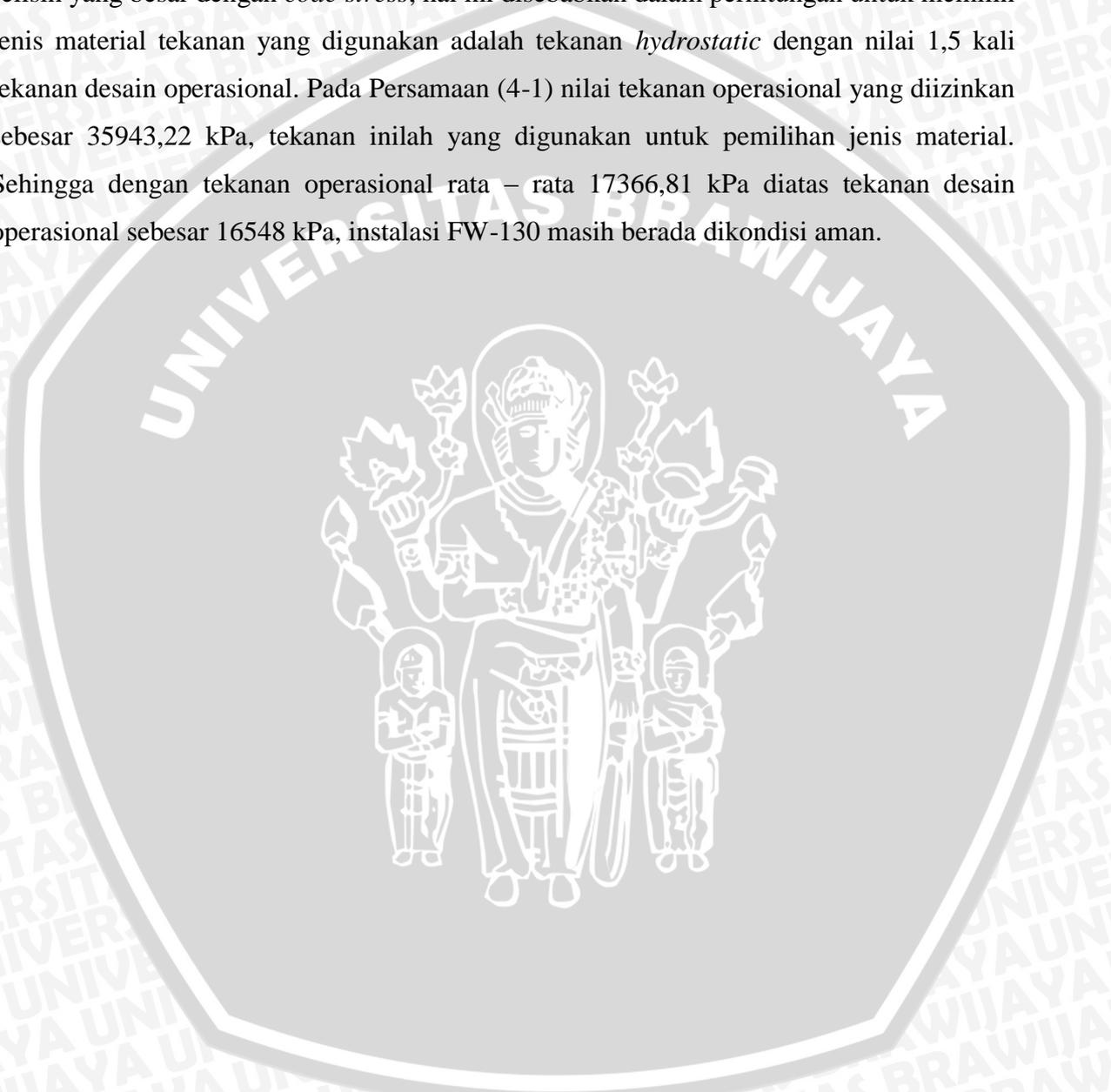


Gambar 4.5 Skema Titik 200 Model 1 dan 2

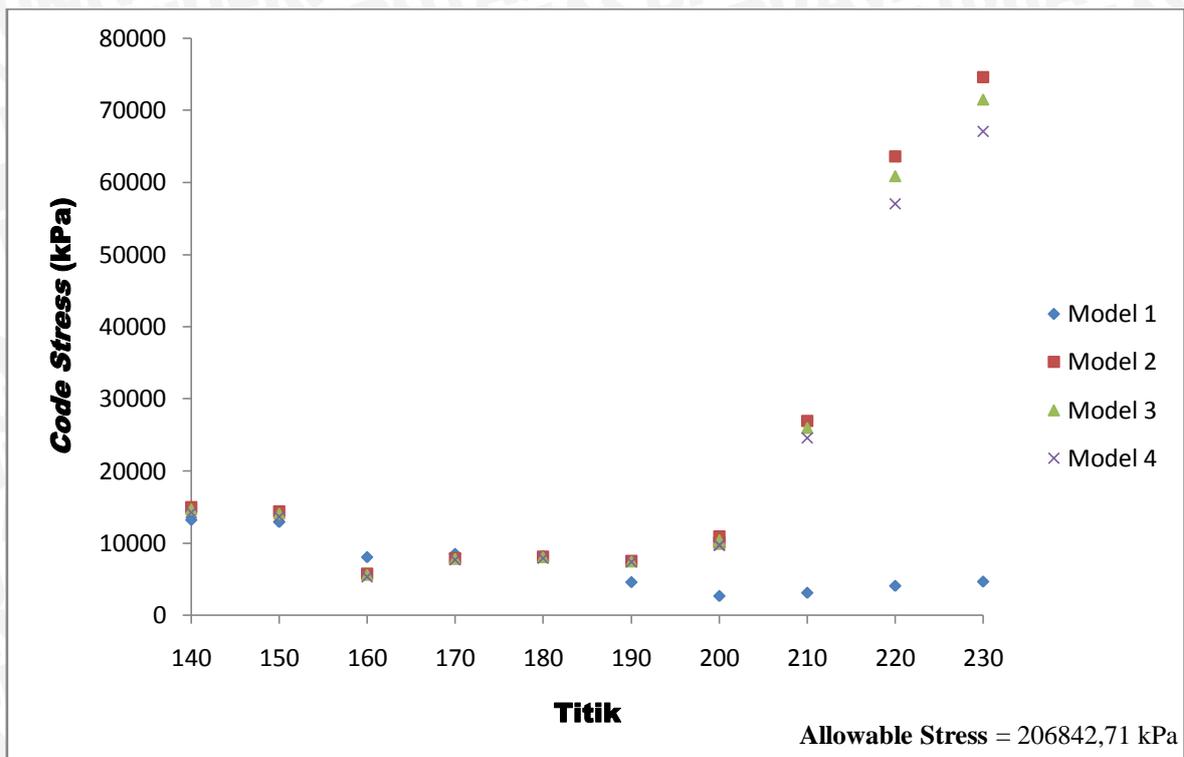
Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa dengan merubah ketebalan dinding pipa (Model 2, Model 3 dan Model 4) maka *code stress* akibat *sustained load* mengalami perubahan. Pada grafik dapat dilihat urutan model yang memiliki *code stress* akibat *sustained load* dari yang terkecil hingga yang terbesar yaitu Model 2 (Sch. 160), Model 3 (Sch. 120), Model 4 (Sch 80). Pada kasus *sustained load* sesuai dengan Persamaan (2-13), bahwa *code stress* merupakan penjumlahan dari *bending stress* dan *pressure stress*. *Bending stress* akibat *sustained load* dipengaruhi oleh momen resultan yang merupakan momen reaksi pada pipa akibat pembebanan. Masing – masing model memiliki momen inersia dan luas penampang yang berbeda. Pada Persamaan (4-13) dapat dilihat semakin besar nilai momen inersia dan luas penampang maka *displacement* akan semakin kecil, namun *displacement* pada masing – masing model akibat *sustained load* memiliki perbedaan yang tidak begitu besar. Selain itu semakin besar momen inersia dan luas penampang maka reaksi pada ujung batang akan semakin besar (matriks reaksi pada ujung batang terkekang yang tidak dipengaruhi beban [FMD]). Namun *bending stress* dipengaruhi oleh momen resultan dan *section modulus*, sesuai dengan Persamaan (2-15) semakin besar *section modulus* maka *bending stress* akan semakin kecil dan juga diketahui bahwa selisih momen resultan antara masing – masing model yang tidak begitu besar. Sedangkan *pressure stress* dipengaruhi tekanan dibagian dalam pipa dan ketebalan pipa, sesuai dengan Persamaan (2-7) semakin besar nilai ketebalan pipa maka *pressure stress* akan semakin kecil. Urutan nilai *pressure stress* dari yang terkecil hingga terbesar yaitu

Model 2 = 24342,88 kPa; Model 3 = 32070,20 kPa; Model 4 = 45300,27 kPa. *Pressure stress* inilah yang menyebabkan *code stress* antara masing – masing model memiliki selisih yang besar.

Antara titik 140 – 230 pada masing – masing model *code stress* akibat *sustained load* masih dibawah *allowable stress* 137895,14 kPa. *Allowable stress* memiliki selisih yang besar dengan *code stress*, hal ini disebabkan dalam perhitungan untuk memilih jenis material tekanan yang digunakan adalah tekanan *hydrostatic* dengan nilai 1,5 kali tekanan desain operasional. Pada Persamaan (4-1) nilai tekanan operasional yang diizinkan sebesar 35943,22 kPa, tekanan inilah yang digunakan untuk pemilihan jenis material. Sehingga dengan tekanan operasional rata – rata 17366,81 kPa diatas tekanan desain operasional sebesar 16548 kPa, instalasi FW-130 masih berada dikondisi aman.



4.6.3 Analisa Code Stress Akibat Expansion Load



Gambar 4.6 Code Stress Akibat Expansion Load Masing – masing Model Antara Titik 140 – 230

Pada Gambar 4.6 antara titik 140 – 230 dapat dilihat bahwa terdapat perubahan besar tegangan akibat perubahan penyangga pipa dengan ketebalan pipa yang sama (Model 1 dan Model 2). Seperti pada kasus *sustained load*, perubahan tegangan ini disebabkan oleh *displacement*, karena Model 1 dan Model 2 memiliki modulus elastisitas, momen inersia, luas penampang, temperatur, koefisien muai panas dan panjang setiap elemen pipa yang sama. Model 1 pada titik 200 jenis penyangga pipa merupakan jenis *pipe guide* yang berfungsi untuk mengarahkan pergerakan pipa, pada Gambar 4.5 dapat dilihat penyangga pada titik 200 memungkinkan pergerakan pipa pada arah sumbu z (+z dan -z), sumbu +y dan rotasi pada masing – masing sumbu. Sedangkan Model 2 pada titik 200 jenis penyangga pipa diganti dengan jenis *anchor* yang berfungsi untuk menahan pergerakan dan rotasi pipa pada masing – masing sumbu. Sesuai dengan Persamaan (2-43) momen reaksi ini dipengaruhi oleh matriks reaksi pada ujung batang terkekang yang tidak dipengaruhi beban [FMD], matriks reaksi pada ujung batang terkekang yang dipengaruhi beban {FML} dan matriks perpindahan {D}. Perbedaan *displacement* inilah yang menyebabkan *code stress* akibat *expansion load* Model 1 dan Model 2 berbeda.

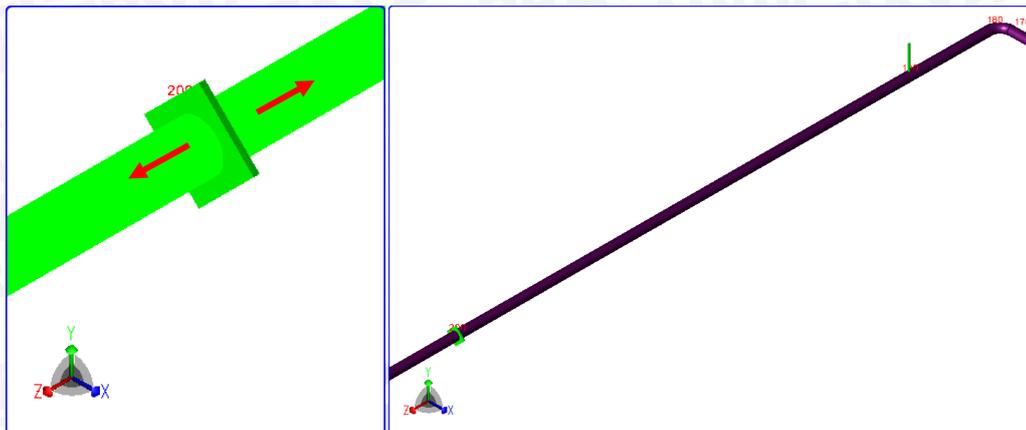
Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa semakin tipis dinding pipa maka *code stress* akibat *expansion load* akan semakin kecil. Pada grafik dapat dilihat urutan model

yang memiliki *code stress* akibat *expansion load* dari yang terkecil hingga yang terbesar yaitu Model 4 (Sch 80), Model 3 (Sch. 120), Model 2 (Sch. 160). Pada kasus *expansion load code stress* merupakan *bending stress*. Seperti halnya pada kasus *sustained load*, momen resultan dipengaruhi oleh matriks [FMD], sesuai dengan Persamaan (4-22) semakin besar momen inersia dan luas penampang maka reaksi pada ujung batang akan semakin besar. *Bending stress* dan *shear stress* dipengaruhi oleh momen bending, momen torsi dan *section* modulus, sesuai dengan Persamaan (2-17) semakin besar *section* modulus maka *bending stress* akan semakin kecil. Jika dilihat pada hasil perhitungan momen resultan akibat *expansion load* memiliki selisih yang begitu besar, hal inilah yang menyebabkan Model 2 memiliki *code stress* terbesar meskipun dengan *section* modulus yang lebih besar dari pada model lainnya.

Antara titik 140 – 230 pada masing – masing model *code stress* akibat *expansion load* masih dibawah *allowable stress* sebesar 206842,71 kPa. *Allowable stress* memiliki selisih yang besar dengan *code stress*, hal ini disebabkan dalam perhitungan untuk memilih jenis material selain tekanan juga melibatkan temperatur. Temperatur desain operasional sebesar 296°C sedangkan temperatur operasional rata – rata 159,89°C. Selain itu pada kasus *expansion load allowable stress* dikalikan dengan *safety factor* sesuai dengan Persamaan (2-18).

4.6.4 Analisa Total Displacement

Pada Lampiran 9 dapat dilihat akibat perubahan penyangga pipa dengan ketebalan pipa yang sama (Model 1 dan Model 2) total *displacement* masing – masing titik mengalami penurunan. Pada Lampiran 9 dapat dilihat penyebab *displacement* terbesar diakibatkan *expansion load*. Pada Gambar 4.7 dapat dilihat Model 2 pada titik 200 jenis penyangga pipa diganti dengan jenis *anchor* yang berfungsi untuk menahan pergerakan dan rotasi pipa pada masing – masing sumbu. Dengan mengganti tumpuan pipa menjadi *anchor* pada titik 200, maka dari titik ini ekspansi pipa diarahkan pada sumbu +z dan -z. Secara umum ekspansi pipa dipengaruhi oleh temperatur, koefisien muai panas dan panjang pipa. Sehingga dengan menahan ekspansi pada titik 200 pada Model 2 dalam arah sumbu z titik 180 hanya memperoleh pengaruh ekspansi dari titik 180 sampai 200 (sepanjang 7669 mm), sedangkan pada Model 1 (kondisi saat ini) titik 180 memperoleh pengaruh ekspansi dari titik 180 sampai 230 (19650 mm).



Gambar 4.7 Skema Titik 200 Model 2

Dapat dilihat juga dengan merubah ketebalan dinding pipa total (Model 2, Model 3 dan Model 4) displacement antara titik 140 – 200 mengalami penurunan dengan Model 4 yang memiliki displacement terkecil dari pada model lainnya. Pada Lampiran 9 dapat dilihat penyebab *displacement* cenderung diakibatkan *expansion load*. Jika dilihat antara masing – masing model, *displacement* akibat *sustained load* mengalami peningkatan seiring menurunnya ketebalan pipa yaitu Model 2, Model 3 dan Model 4. Sedangkan *displacement* akibat *expansion load* mengalami penurunan seiring menurunnya ketebalan pipa yaitu Model 2, Model 3 dan Model 4. Sesuai dengan Persamaan (2-42) *displacement* akibat *sustained load* dan *expansion load* pada model yang sama memiliki perbedaan pada matriks $\{f\}$. Pada kasus *sustained load* matriks $\{f\}$ dipengaruhi oleh gaya yang bekerja dan panjang elemen, sedangkan pada kasus *expansion load* matriks $\{f\}$ dipengaruhi oleh modulus elastisitas, luas penampang, koefisien muai panas dan temperatur, komponen inilah yang menyebabkan *displacement* pada kasus *expansion load* lebih besar daripada *sustained load*, sehingga *displacement* total cenderung dipengaruhi oleh *displacement* akibat *expansion load*. Dengan menurunnya ketebalan dinding pipa maka luas penampang pipa akan semakin kecil, sehingga *displacement* total juga akan semakin kecil.