

ANALISIS TEGANGAN PADA BENGKOKAN PIPA DALAM SISTEM PEMIPAAN FASILITAS NUKLIR DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

B. Bandriyana- P2SRM –BATAN, Utaja-P2PN- BATAN

Abstrak

Analisis tegangan pipa dengan metode elemen hingga dilakukan untuk melengkapi hasil analisis tegangan dari program CAESAR. Perhitungan dilakukan pada kondisi pembebanan statik akibat berat mati dan tekanan operasi serta beban termal untuk suatu model sistem pemipaan dengan elemen pembengkokan pipa. Pipa dan elemen bengkokan diambil dari salah satu cabang pemipaan dalam fasilitas nuklir yang beroperasi dengan tekanan 10 MPa dan temperatur 200°C. Perhitungan tegangan dengan metode elemen hingga menggunakan program ANSYS 5.4 dengan tipe elemen SOLID 72 untuk pemodelan 3 dimensi. Hasil perhitungan tegangan disajikan dalam kurva distribusi tegangan total (von mises stress), dan pergeseran total, dengan tegangan maksimum di bengkokan pipa sebesar 40 MPa dan pergeseran maksimum 0,01 m. Hasil perhitungan menunjukkan harga tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil analisis tegangan menggunakan program CAESAR.

Kata kunci: analisis tegangan, elemen hingga

Abstract

STRESS ANALYSIS ON THE PIPE BENDS OF THE PIPING SYSTEM FOR NUCLEAR FACILITY WITH FINITE ELEMENT METHOD. Piping stress analysis using the finite element method was performed to complete the pipe stress analysis of CAESAR computer program. The calculation of stress was done on the static load of dead weight, operating and thermal load condition of the piping system with bend elements arrangements model. The pipes and pipe bends was taken from a piping line system of the nuclear facility which was operated in 10 MPa of pressure and 200°C of temperature. The stress calculation was carried out utilizing the ANSYS 5.4 computer program using the element type of SOLID 72 with 3 dimension modeling system. The results was illustrated in the distribution curve of total (von mises) stress and total displacement with the maximum stress at the bend pipe of 40 MPa and maximum displacements of 0,01 m. The calculation result gave lower stress comparing with the result of stress analysis using the CAESAR program.

Key words: stress analysis, finite element

PENDAHULUAN

Sistem pemipaan dalam fasilitas nuklir didesain dengan persyaratan keandalan dan keselamatan yang tinggi berdasarkan standar ASME III untuk daerah nuklir dan standar B.31.1 untuk daerah non nuklir. Salah satu persyaratan yang penting adalah tidak boleh ada kebocoran dari fluida khususnya yang berisikan fluida dengan kandungan zat radio aktif. Untuk mencegah terjadinya kebocoran tersebut komponen pemipaan dengan *flange* dan sambungan las perlu dihindari. Dalam sistem pemipaan ini banyak digunakan elemen bengkokan pipa untuk pengganti *elbow*.

Untuk menjamin keselamatan dan keandalan sistem dilakukan analisis tegangan

pada sistem pemipaan fasilitas nuklir menggunakan program komersial. Dalam program ini setiap pipa lurus ataupun elemen pemipaan seperti *bend*, siku, *Tee*, ataupun katup dianggap merupakan satu atau dua titik dengan tegangan yang sama dan merata. Untuk sistem dan komponen pemipaan yang kritis termasuk dalam perhitungan tegangan untuk *bend pipe*, perhitungan ini kurang teliti mengingat dalam *bend pipe* terjadi perubahan tampang melintang ataupun adanya distribusi dan konsentrasi tegangan akibat bentuk dan geometri komponen. Analisis yang lebih teliti dapat dilakukan berdasarkan metode elemen hingga. Metode ini dapat menghasilkan perhitungan yang lebih teliti karena dapat memodelkan dengan elemen kecil

mengikuti bentuk, dan bisa memberikan distribusi besarnya tegangan pada masing-masing titik dalam komponen.

Makalah ini menguraikan perhitungan dan analisis tegangan dalam sistem pemipaan dengan metode elemen hingga, dan diskusi serta analisis perbandingan dengan hasil perhitungan analisis tegangan pipa secara konvensional. Untuk perhitungan diambil salah satu rangkaian pemipaan dalam fasilitas nuklir dengan rangkaian bengkokan pipa (*bend pipe*). Analisis dan perhitungan menggunakan paket program ANSYS 5.4 *multi purpose* dengan kombinasi beban temperatur, tekanan dan beban berat mati.

TEORI

Analisis tegangan sistem pemipaan

Perhitungan dalam analisis tegangan pipa dengan program CAESAR dilakukan dengan menganggap tiap elemen pemipaan sebagai batang dan besarnya tegangan pada setiap komponen ditentukan oleh besarnya beban, faktor geometri dan material yang digunakan. Tegangan yang diizinkan dalam desain dan rumus perhitungan tegangan pipa untuk fasilitas nuklir mengacu pada standard ASME III, kelas 2. Tegangan pipa dan batas tegangan maksimum yang diizinkan dianalisis berdasarkan rumusan untuk berbagai pembebanan tergantung dari kondisi sistem. Untuk beban statik dan termal, analisis tegangan dilakukan dengan menghitung dan memeriksa batas tegangan akibat beban statik, beban termal dan gabungan seperti ditunjukkan masing-masing dalam rumus (1), (2) dan (3) sebagai berikut ^[1]:

$$S = \frac{B_1 P D_0}{2t_n} + \frac{B_2 (M_{DW} + M_{SSE})}{Z},$$

tegangan izin $1,5 S_h$ (1)

$$S = i Mc / Z,$$

tegangan izin = S_a (2)

$$S = P D_0 / (4t_n) + (0,75 i M_{DW} / Z) + (i Mc) / Z,$$

tegangan izin = $S_A + S_h$ (3)

dimana:

- S = tegangan pada pipa, (Pa),
- S_y = tegangan tarik yang diizinkan, (Pa)
- S_h = tegangan tarik izin suhu operasi, (Pa)
- M_{DW} = momen akibat berat, (Nm)
- M_e = momen total, (Nm)
- M_{te} = momen puntir, (Nm)
- M_{SSE} = momen akibat seismik, (Nm)
- M_b = momen bengkok (*bending*), (Nm)

- t_n = tebal pipa, (m)
- D₀ = diameter luar pipa, (m)
- Z = *section modulus*, (m³)
- F_a = gaya aksial, (N)
- F_v = gaya vertikal, (N)
- B₁ dan B₂ = konstanta
- P = tekanan operasi, (Pa)

Perhitungan tegangan dengan metode elemen hingga

Dasar dari metode elemen hingga adalah membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban (*load*) pada kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan. Dari elemen-elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matrik yang bisa diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada benda kerja tersebut. Dari penyelesaian matematis dengan menghitung inverse matrik akan diperoleh persamaan dalam bentuk matrik untuk satu elemen dan bentuk matrik total yang merupakan penggabungan (*assemblage*) matrik elemen.

Secara garis besar bentuk persamaan dalam penyelesaian regangan dan tegangan untuk struktur dan pemipaan didasarkan pada rumus dasar perhitungan kekuatan dalam konstruksi mekanik untuk daerah elastis sebagai berikut ^[2,3]:

$$F = (AE/l) \Delta l \tag{4}$$

dimana :

- F = gaya atau beban, N
- A = luas penampang, m²
- E = modulus elastisitas, Pa
- Δl = pertambahan panjang, m

Dari rumus dasar yang menunjukkan hubungan antara beban, sifat bahan, geometri dan pergeseran yang ditimbulkan dapat disusun bentuk umum persamaan dalam elemen dengan persamaan matrik. Untuk problem pemipaan perhitungan tegangan akibat beban mekanik dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan matrik serta memberikan syarat batas dan pembebanan pada persamaan sebagai berikut ^[2,3]:

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

dimana:

- [K] = matrik kekakuan,
- {u} = matrik pergeseran,
- {F} = matrik beban

Untuk pembebanan termal rumus tegangan didasarkan pada besarnya perbedaan regangan pada setiap titik dan elemen akibat terjadinya distribusi temperatur yang tidak merata. Secara umum bentuk rumusan tegangan termal dapat disusun dalam persamaan matrik sebagai berikut [3]:

$$\sigma = D \varepsilon = D [\alpha \Delta T]^T \quad (5)$$

dimana:

D = matrik konstanta yang bergantung pada jenis bahan dan dinyatakan dalam besaran modulus Young (E) dan angka Poisson (ν).

ε = regangan,

α = koefisien muai panas dari bahan,

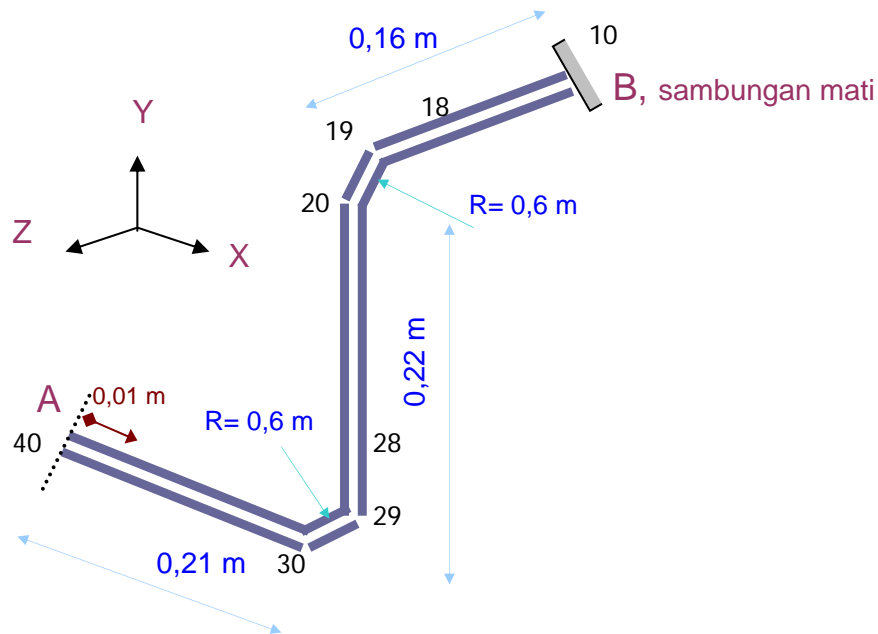
ΔT = beda suhu

program ANSYS 5.4 untuk memperoleh hasil akhir berupa nilai dan distribusi tegangan pada seluruh titik elemen pada komponen dengan mengikuti langkah perhitungan yang diatur dalam penggunaan program tersebut. Program ANSYS telah menyusun penyelesaian persamaan dari gabungan dengan berbagai macam pembebanan yang disusun dari penyelesaian dengan menghitung inverse matrik menggunakan teknik iterasi.

METODA DAN TATA KERJA

Data dan rangkaian pemipaan

Rangkaian pemipaan diambil dari data desain salah satu cabang pemipaan sistem pembuangan panas sisa pada pembangkit listrik



Gambar 1. Skema isometrik model sistem pemipaan dengan bengkokan pipa

Dengan menyelesaikan inverse matrik yang terbentuk dalam persamaan dapat diperoleh hasil berupa distribusi tegangan termal pada sistem.

Berdasarkan bentuk persamaan matrik untuk tiap elemen dapat disusun bentuk persamaan matrik untuk gabungan yang kemudian memberikan hasil tegangan pada setiap titik dan elemen. Penyelesaian akibat beban mekanik dan termal dapat juga diselesaikan dengan menggabungkan dua jenis pembebanan dan memberikan syarat batas dan menyelesaikan persamaannya. Penyelesaian metode elemen hingga dapat diselesaikan dengan perhitungan menggunakan

tenaga nuklir dengan gambar isometrik seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 [4].

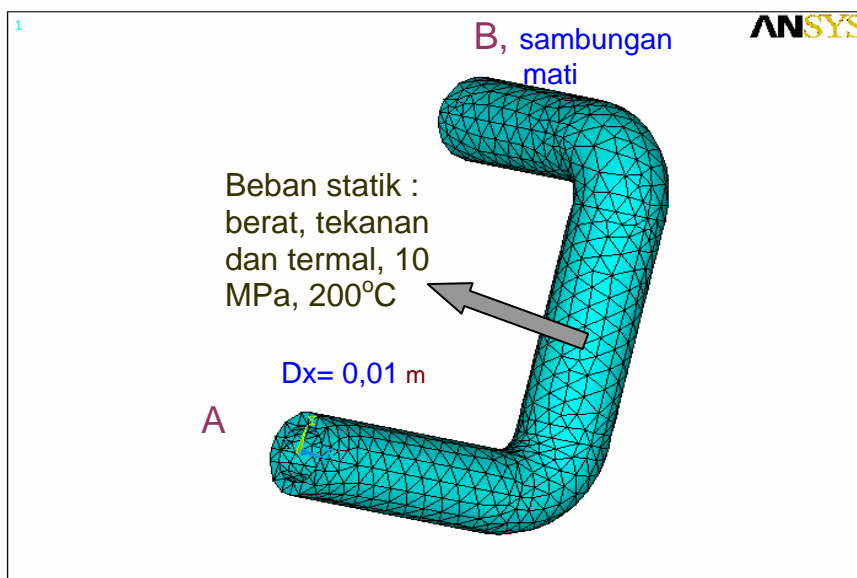
Rangkaian pipa terdiri dari pipa lurus dan 2 bengkokan pipa dengan dua titik perletakan. Titik perletakan di A merupakan angkor (sambungan mati) sedangkan perletakan di B merupakan pemegang dengan pergerakan/ pergeseran ke arah sumbu X diijinkan sebesar 0,01 m dan pergerakan lainnya dianggap mati. Ukuran bengkokan pipa diambil dari standard dan data teknis komponen, data teknis pokok yang menyangkut geometri, material dan data operasi serta pembebanan yang diperlukan untuk analisis tegangan diberikan dalam Tabel 2.

Dalam analisis menggunakan program CAESAR sistem pemipaan ini dibagi dalam 8 titik untuk analisis yaitu titik 10 (titik A), 18, 19, 20, 18, 19, 30 dan titik 40 (titik B).

Tabel 1. Spesifikasi dan data teknik sistem pemipaan^[4]

Pipa dan bungkakan:	:	0,4 m
- Diameter luar	:	0,012 m
- Tebal	:	0,6 m
- Jari-jari bungkakan	:	
- Bahan	:	SS 304L
- Modulus elastisitas	:	1,27 Gpa
- Angka Poison	:	0,28
- Fluida	:	Air bertekanan
- Temperatur:	:	200°C
- Tekanan:	:	100 Bar (10 MPa)

kecil yang selanjutnya dianalisis dengan kondisi pembebanan dalam perhitungan. Untuk analisis 3 dimensi dilakukan *meshing* pada seluruh rangkaian sistem pemipaan dengan *meshing* secara otomatis. Beban dan syarat batas dalam perhitungan diambil dari data konfigurasi komponen dalam sistem pemipaan, dengan ujung 1 diberikan pergeseran arah -X sebesar 10 mm dan arah lainnya dengan pergeseran nol. Pada sistem pemipaan bekerja beban statik dari berat mati dan tekanan sebesar 100 Bar (10 MPa) serta beban termal dari suhu operasi 200°C. Garis besar hasil *meshing* dan pemberian syarat batas untuk perhitungan diberikan dalam Gambar 2. Untuk operasi data input geometri, data material, *meshing*, pembebanan dan syarat batas ditampilkan dalam *input file* ^[6].



Gambar 2. Meshing dan pembebanan pada sistem pemipaan

Alur untuk perhitungan tegangan

Analisis dengan metode elemen hingga dilakukan dengan program ANSYS 5.4 dengan urutan proses perhitungan: pemodelan, *meshing*, pemberian beban dan syarat batas, penyelesaian dan interpretasi hasil ^[5]. Untuk perhitungan dan analisis tegangan dalam bungkakan pipa dilakukan pemodelan dengan model 3 dimensi. Bentuk, ukuran dan data material serta data pembebanan diambil berdasarkan model isometrik pipa pada Gambar 1 dan data teknis seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Meshing adalah membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen

Input file untuk analisis tegangan

```

/prep7
ET,1,SOLID72
mp,ex,1,207e9
mp,nuxy,1,0.28
CYL4,0,0,0.28,,0.4
VEXT,1,,0,,2.1,,,,
K,1000,0,0,2.1,
K,1001,0,0.6,2.7,
K,1002,0,0.6,2.1,
LARC,1000,1001,1002,0.6,
VDRAG,,2,,,,,25
LDELE,,25,,1
K,1003,0,0.6,2.7,
    
```

```

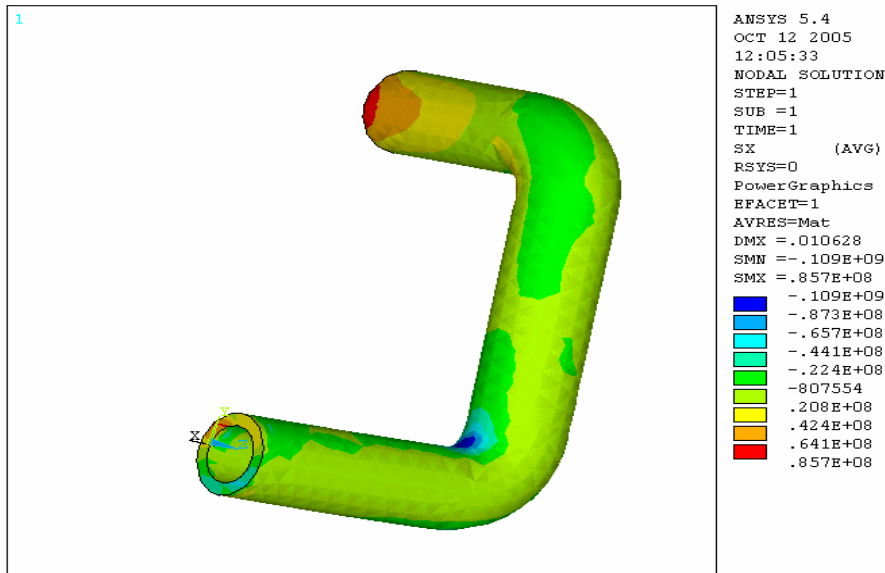
K,1004,0,2.8,2.7,
K,1005,0.6,3.4,2.7,
K,1006,0.6,2.8,2.7,
K,1007,2.2,3.4,2.7,
LSTR, 1003, 1004
LSTR, 1005, 1007
LARC,1004,1005,1006,0.6,
VDRAG, 19, , , , , 25
VDRAG, 28, , , , , 43
VDRAG, 37, , , , , 42
LDELE, 42, , , 1
LDELE, 25, , , 1
LDELE, 43, , , 1
KDELE, 1006
KDELE, 1002
vplot
smrsize,7
mshkey,0
vmesh,all
/SOLU
asel,s,,46
nsla,s,1
d,all,,0,,all
allsel
asel,s,,1
nsla,s,1
d,all,,0.01,,,uz
asel, s, pres, 10e6
asel, s, temp, 200
allsel
solve
    
```

dengan *running program* untuk ANSYS 5.4, yang dalam perhitungan didasarkan pada rumusan dasar seperti ditunjukkan dalam rumus (4), (5) dan (6). Hasil perhitungan dalam bentuk *output* dapat dilihat pada *post processor* berupa distribusi tegangan, regangan dan pergeseran^[6]. Untuk analisis lebih lanjut dibandingkan harga dari hasil perhitungan dengan program CAESAR dengan analisis untuk rumusan beban seperti ditunjukkan dalam rumus (1), (2) dan (3).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan dengan program ANSYS 5.4 dapat diperoleh distribusi tegangan, regangan dan pergeseran total. Hasil perhitungan berupa distribusi tegangan total (*von misses stress*) ditunjukkan dalam Gambar 3 dan 4 untuk menunjukkan tegangan lokal pada sisi luar dan dalam dari sistem pemipaan secara 3 dimensi. Untuk melengkapi analisis ditunjukkan distribusi pergeseran total dari sistem pemipaan pada Gambar 5.

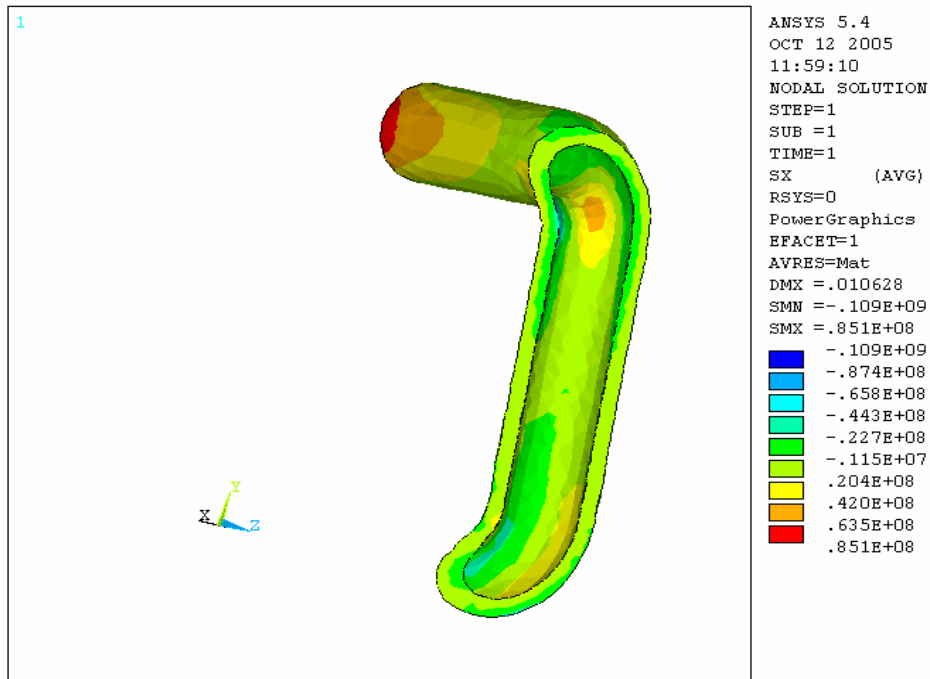
Untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode elemen hingga dengan program komersial disajikan pula hasil perhitungan tegangan dari sistem pemipaan dengan menggunakan program CAESAR. Program perhitungan CAESAR untuk tegangan maksimum diambil berdasarkan rumusan pembebanan seperti disajikan dalam rumus (3), hasil perhitungan ditunjukkan dalam Tabel 2^[7].



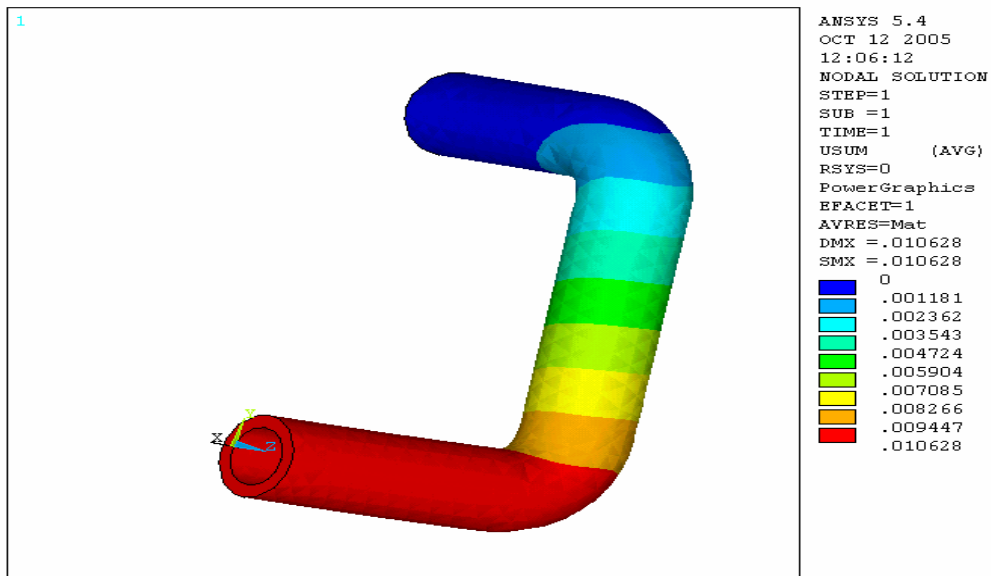
Gambar 3. Pola distribusi tegangan total (*vonmises*)

Dari input berupa gambar geometri, *meshing* dan pembebanan dilakukan perhitungan

Berdasarkan hasil perhitungan tegangan yang disajikan dalam Gambar 3 dan 4 diperoleh harga



Gambar 4. Pola distribusi tegangan total untuk pipa bagian dalam



Gambar 5. Pola distribusi pergeseran total pada sistem pemipaan

tegangan tekan maksimum sebesar 85,7 MPa yang terjadi pada ujung perletakan dalam sistem pemipaan. Pada bagian bengkokan pipa tegangan rata-rata berkisar pada 20-30 MPa berupa tegangan tarik dan tekan, dengan tegangan maksimum pada beberapa titik pada bagian luar dan dalam dari sistem dan bengkokan pipa sebesar 40 MPa. Dari Gambar 5 diperoleh hasil perhitungan pergeseran

maksimum sebesar 0,01 m yang terjadi disekitar daerah ujung perletakan pipa di titik 40. Dari hasil perhitungan untuk regangan total diperoleh harga regangan yang kecil, dari 0,001–0,003. Dari perhitungan dengan program CAESAR yang ditunjukkan dalam Tabel 2, besarnya tegangan maksimum sebesar 76 MPa terjadi pada ujung perletakan (angkor, titik 10), tegangan pada pipa dan bengkokan pipa merata dengan harga

sekitar 70 MPa. Harga tegangan total ini diperoleh dari beban gabungan antara beban berat mati dan tekanan dengan beban termal akibat temperatur operasi. Untuk tinjauan beban dari beban mati atau beban termal secara terpisah diperoleh harga tegangan dibawah 70 MPa. Besarnya pergeseran total dari hasil perhitungan beban gabungan sebesar 0,02 m.

Hasil perhitungan dengan program ANSYS maupun CAESAR memperoleh harga tegangan yang berbeda. Untuk perhitungan dengan CAESAR diperoleh harga hampir merata dengan tegangan maksimum sekitar 76 MPa dan masih dibawah batas yang diijinkan sebesar 78 MPa^[7]. Tegangan untuk setiap komponen sama besar, dengan anggapan terjadi tegangan yang merata dalam seluruh komponen. Untuk perhitungan ANSYS diperoleh berbagai macam harga yang berbeda dalam komponen akibat pengaruh bentuk geometri, dan pada beberapa daerah besarnya tegangan lebih kecil dibanding perhitungan dengan CAESAR.

Pada bagian bengkokan pipa, hasil perhitungan dengan metode elemen hingga menunjukkan tegangan sekitar 20 MPa dengan harga tegangan lokal maksimum sekitar 40 MPa, lebih kecil dari hasil perhitungan CAESAR. Dalam sistem pemipaan, seperti juga dalam hasil perhitungan untuk beberapa sistem bengkokan pipa dan sistem pemipaan lainnya, hasil perhitungan CAESAR lebih konservatif dibanding hasil perhitungan dengan metoda elemen hingga^[8]. Secara umum perhitungan metoda elemen hingga dapat menghasilkan harga tegangan lokal pada bengkokan atau komponen lainnya dengan harga berbeda akibat pengaruh bentuk dan geometri, dalam perhitungan program CAESAR harga tegangan lokal ini tidak diperoleh pada setiap titik. Dari hasil perhitungan ini bisa dikatakan bahwa metode elemen hingga lebih tekiti dengan memberikan hasil pada tiap titik dan bisa menghasilkan desain lebih teliti dan efisien. Bergantung pada pengaruh bentuk dan geometri, tegangan lokal pada komponen dapat lebih besar dibanding hasil perhitungan program CAESAR, misalnya dalam perhitungan tegangan komponen-T dalam sistem pemipaan. Perhitungan dengan elemen hingga dapat memberikan masukan yang penting untuk perhitungan lebih lanjut dalam analisis kerusakan *fatigue*, *creep* serta timbulnya retak pada komponen kritis dalam sistem yang didesain dengan ketelitian tinggi. Perhitungan dengan metode elemen hingga ini mudah dikembangkan untuk analisis desain, yaitu dengan mengubah *input file*. Ketelitian dari hasil perhitungan ditentukan oleh visualisasi atau modeling yang diambil, baik dalam pemilihan tipe elemen

ataupun penentuan syarat batas dalam pembebanan. Untuk sistem pemipaan dalam industri, perhitungan dengan CAESAR cukup baik dan memadai dengan pelaksanaan perhitungan lebih mudah, meskipun sedikit konservatif. Perhitungan dengan metode elemen hingga untuk sistem pemipaan yang kompleks sulit dilakukan khususnya untuk pembuatan gambar modelingnya. Untuk sistem pemipaan dapat digunakan perhitungan dengan CAESAR, tetapi untuk analisis elemen kritis perlu dilengkapi dengan perhitungan khusus menggunakan metode elemen hingga.

KESIMPULAN

Analisis tegangan pipa dengan metode elemen hingga pada sistem pemipaan dengan bengkokan pipa dalam fasilitas nuklir menghasilkan distribusi tegangan pada seluruh sistem dan komponen pemipaan. Hasil perhitungan menghasilkan tegangan lokal maksimum pada bengkokan pipa sebesar 40 MPa, lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan program CAESAR, sebesar 70 MPa. Untuk analisis desain sistem pemipaan, metode elemen hingga lebih sulit digunakan dibanding dengan program CAESAR khususnya dalam visualisasi dan penggambaran model pemipaan. Metode elemen hingga digunakan untuk melengkapi hasil analisis tegangan pipa dengan menghitung tegangan lokal maksimum yang dapat digunakan sebagai data masukan dalam analisis fatik dan perambatan retak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih kepada Bapak Sunardi Dipl. Ing., konsultan modeling ANSYS-P2SRM-BATAN yang banyak membantu dalam modeling dan perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Sub section NC", 1989 Edition up to and including 1989 Addenda B.
2. FRANK STASSA, "Applied Finite Element Analysis for Engineers", CBS College Publishing, USA, 1989.
3. SAEED MOAVENI, "Finite Element Analysis," Prentice Hall, New Jersey, 1999.
4. BANDRIYANA, "RNS-PLA-400 (Residual Heat Removal System Line) Piping Stress Analysis Report", Rev. 0, Westinghouse energy Center- USA, 1996.
5. ANONIM, "Manual User ANSYS 5.4", ANSYS Incorporated, Pittsburgh, 1998.
6. ANONIM, "ANSYS Structural Analysis Guide," ANSYS, Inc., 1994.

7. CAESAR II Computer Program Version 3.24, June 1997
8. D.MACKENZIE, "Comparison of Flexibility and Finite Element Analysis of Example Piping Systems," The International Conference Structural Mechanics in Reactor Technology, Atomic Energy Society of Japan, 1991
9. B.BANDRIYANA, "Studi Analisis Tegangan pada Sambungan-T dalam Sistem Pemipaan PLTN dengan Metode Elemen Hingga," Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN XI, Malang, 2005.