

ANALISIS PERUBAHAN TEKANAN PADA VARIASI SUDUT BELOKAN PIPA

Abdul Hafid, Alim Mardhi
PTRKN – BATAN

ABSTRAK

ANALISIS PERUBAHAN TEKANAN PADA VARIASI SUDUT BELOKAN PIPA. Pipa *hot leg* adalah salah satu pipa pendingin primer pada reaktor daya nuklir jenis air tekan. Salah satu bentuk reaktor daya tersebut adalah AP1000 yang menggunakan pipa *hot leg* dengan temperatur dan tekanan air dalam pipa 321°C dan 16 MPa. Adanya belokan pipa untuk memberikan jalur aliran bereksistensi rendah dan fleksibel untuk mengakomodasi perbedaan ekspansi antara pipa *hot leg* dan *cold leg*. Kerugian energi pada aliran dalam pipa antara lain karena gesekan air dengan dinding pipa, perubahan diameter dan akibat adanya belokan. Biasanya sudut belokan pipa yang digunakan industri adalah 30°, 45°, 60°, dan 90° tetapi pada pipa *hot leg* menggunakan sudut 51°. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perbedaan kehilangan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi pada aliran dalam pipa akibat adanya belokan pipa dengan beberapa variasi sudut belokan pipa dengan cara simulasi dengan pemodelan. Metode yang digunakan adalah pemodelan dengan elemen hingga yang dibuat menggunakan perangkat lunak MSC Marc Mentat dengan obyek penelitian PLTN AP1000. Pada belokan pipa 30° *pressure drop* yang terjadi sebesar 27.899 Pa sedangkan pada sudut belokan 90° adalah 189.190 Pa.

Kata kunci: *pressure drop*, variasi belokan, *hot leg*, simulasi, pemodelan

ABSTRACT

PRESSURE DROP ANALYSIS ON PIPE BEND VARIATION. *Hot leg pipe is one of the primary coolant in a nuclear power reactor pressurized water reactor type. One the form is the AP1000 power reactor that use the hot leg pipe with water pressure and temperature and in the pipe 15,6 MPa and 321°C. Existence of pipe bends to provide low flow path existence and flexible to accommodate the expansion of the difference between cold leg and hot leg pipe. Energy losses in the flow in the pipe is partly because of friction with the water pipe wall, the diameter changes and due to the bends. Usually used angle bend pipe industry is 300, 450, 600, and 900 but at the hot leg pipe using a 510 angle. The purpose of this research is to analyze the difference in pressure loss (pressure drop) that occur in the flow in the pipe due to pipe bends with some variation of angle bend pipe by means of simulation by modeling. The method used is the finite element modeling are made using software MSC Marc Mentat with research object NPP AP1000. At the bend pipe 300 pressure drop that occurs at 27 899 Pa., while on the bend angle 900 is 189 190 Pa*

Keywords: *pressure drop*, variation bends, *hot leg*, simulation, modeling

PENDAHULUAN

Pipa *hot leg* adalah salah satu pipa pendingin primer pada sistem pendingin primer (*reactor coolant system*=RCS) Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) PWR tipe AP1000. Pipa ini memegang peran penting untuk transportasi panas dengan media air temperatur dan tekanan tinggi dari bejana tekan reaktor ke pembangkit uap. Temperatur dan tekanan operasi air yang mengalir dalam pipa mencapai 321°C dan 16 MPa [1]. Penyederhanaan tata letak sistem pendingin primer, baik *cold leg* maupun *hot leg* adalah identik. Adanya belokan pipa untuk memberikan jalur aliran bereksistensi rendah dan fleksibel untuk mengakomodasi perbedaan ekspansi antara pipa *hot leg* dan *cold leg* [2]. Berdasarkan kajian dimensional pipa *hot leg* dengan menggunakan gambar dua dimensi dan pandangan isometrik *loop* pendingin reaktor AP1000 pada AP1000 *European- Design Control Document* [1] diperoleh bahwa besar sudut belokan pipa *hot leg* adalah 51°.

Namun demikian, berdasarkan ilmu mekanika fluida tentang aliran fluida dalam pipa diperoleh bahwa beberapa penyebab kerugian energi pada aliran dalam pipa antara lain karena gesekan air dengan dinding pipa, perubahan diameter dan akibat adanya belokan. Pada belokan pipa terjadi penurunan tekanan (*pressure drop*) yang lebih besar daripada pipa lurus untuk panjang yang sama [3]. Artinya, semakin besar penurunan tekanan maka energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan air

semakin bertambah besar. Penurunan tekanan yang besar akan menimbulkan kavitasi dan getaran serta pusaran air. Kerugian energi pada belokan pipa dipengaruhi oleh debit air, viskositas air dan besar sudut belokan. Berbeda dengan pipa *hot leg*, di dalam industri umum dan penggunaan sehari-hari sudut belokan pipa adalah 30° , 45° , 60° , dan 90° . Dengan demikian seberapa besar sudut belokan pipa perlu menjadi pertimbangan guna mengurangi kerugian energi dan dampak lain yang ditimbulkan dengan tetap mempertimbangkan manfaat pipa dibelokkan.

Hasil penelitian Nadir Arada, dkk padatahun 2007 menyimpulkan: analisis matematis dengan elemen hingga menunjukkan bentuk utama dari inersia aliran belokan pipa adalah adanya gerakan sekunder yang terkait dengan perubahan parameter viskositas dan mempengaruhi distribusi kecepatan aksial dan tegangan geser pada dinding[4].

Penelitian eksperimental Zainuddin, dkk pada tahun 2012 menyatakan: Pengujian *pressure drop* menunjukkan bahwa sudut-sudut sambungan belokan berbanding lurus dengan *pressure drop*. Semakin besar sudut sambungan belokan pipa, nilai *pressure drop* yang dihasilkan semakin besar. Hal ini disebabkan oleh perbedaan tinggi tekan pada sebelum dan setelah belokan pipa yang semakin meningkat. Selain itu diperoleh juga bahwa kecepatan air berbanding terbalik dengan sudut sambungan belokan pipa, semakin besar sudut sambungan belokan pipa maka kecepatan air semakin kecil, dan sebaliknya semakin kecil sudut sambungan belokan pipa kecepatan air semakin besar[5].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perbedaan kehilangan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi pada aliran dalam pipa akibat adanya belokan pipa dengan beberapa variasi sudut belokan pipa dengan cara pemodelan. Tujuan ini dapat diwujudkan dengan metode penelitian simulasi elemen hingga menggunakan perangkat lunak MSC Nastran. Sebagai obyek penelitian digunakan data pipa *hot leg* pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) PWR tipe AP1000.

TEORI

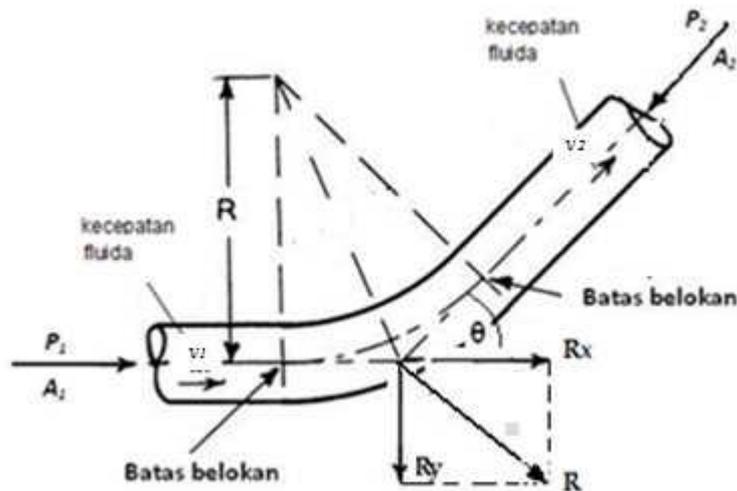
Sistem perpipaan merupakan sistem yang sering digunakan untuk memindahkan fluida cair maupun gas dari satu tempat ke tempat lainnya. Ada dua jenis fluida, yaitu fluida cair dan fluida gas. Air tekanan dan temperatur tinggi termasuk kategori fluida cair. Dalam fluida cair ada lapisan-lapisan yang satu mengalir di atas lapisan yang lain sehingga menjadi bentuk baru. Selama proses perubahan bentuk terjadi tegangan geser (*shear stress*) bergantung pada viskositas dan laju alir yang relatif pada arah tertentu hingga mencapai bentuk akhir. Jika bentuk akhir tercapai maka tegangan geser akan hilang dan cairan dalam kesetimbangan. Hal ini juga berlaku pada air.

Air pada temperatur dan tekanan tinggi mempunyai densitas tertentu. Air akan bersifat *compressible* jika massa jenisnya (*density*) peka terhadap perubahan bentuk variabel temperatur dan tekanan tinggi misalnya menjadi uap. Tetapi jika hanya sedikit terpengaruh oleh perubahan temperatur dan tekanan tinggi maka air tetap tergolong zat *incompressible*. Pada pipa *hot leg* PLTN AP1000, air bersifat *incompressible* karena tidak berubah menjadi uap dan hanya sedikit terpengaruh oleh perubahan temperatur dan tekanan tinggi. Perubahan massa jenis (ρ) air di dalam pipa dapat dinyatakan dengan persamaan (1), yaitu:

$$d\rho = d\left(\frac{m}{V}\right) \quad (1)$$

Dimana m adalah massa air dalam satuan kg dan V adalah volume air di dalam pipa dalam satuan m^3 atau dapat juga dalam satuan liter.

Secara teoritis, dengan Hukum Newton II aliran air pada belokan pipa dapat digambarkan seperti pada Gambar 1. Saat aliran air masuk dengan tekanan dan temperatur tinggi maka air akan mengalir dengan cepat dan ketika sampai pada belokan, air akan menumbuk dinding pipa sehingga arah air akan berpecah dan berbalik. Akibatnya terjadi pusaran air (*vortex*) pada daerah belokan pipa. Secara matematis Hukum Newton II



Gambar 1. Reaksi gaya-gaya pada belokan pipa

Dituliskan seperti persamaan 2, yaitu:

$$\delta F_x = \delta m a_x \quad \delta F_y = \delta m a_y \quad \delta F_z = \delta m a_z \quad (2)$$

Tahun 1827, Navier (1785-1836) melakukan penelitian eksperimental tentang aliran air yang kontinu dalam pipa yang dilanjutkan padatahun 1845 oleh Stokes (1819-1903). Dalam kesimpulannya, Navier-Stokes memperkenalkan istilah fluida Newtonian untuk aliran air kontinu yang *incompressible*. Hukum Newton II dan koefisien viskositas (μ) oleh Navier dan Stokes diuraikan secara matematis dalam bentuk diferensial untuk aliran air dalam pipa yang menghasilkan persamaan (2a), (2b) dan (2c), yaitu:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (2a)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2b)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (2c)$$

Persamaan 2a, 2b dan 2c tersebut disebut sesuai dengan nama pembuatnya yaitu persamaan Navier - Stokes [6]. Dimana g adalah percepatan gravitasi bumi dalam satuan (m/det^2), p adalah tekanan dalam satuan Pa dan u, v serta w adalah arah ditulis dalam bentuk diferensiasi laju relatif (turunan pertama) dan percepatan (turunan kedua) dari aliran fluida dalam pipa yang dalam sumbu mutlak kartesian adalah x, y dan z .

Adanya bentuk matematis yang pada awalnya dikembangkan oleh Navier dan Stokes maka seiring dengan terus berkembangnya penelitian dibidang komputasi sudah banyak penyelesaian fluida dan struktur diselesaikan dengan cara numerik atau metode elemen hingga. Salah satu perangkat lunak (*software*) yang dapat digunakan untuk analisis simulasi dengan pemodelan adalah MSC dengan menggunakan aplikasi khususnya yang disebut Marc Mentat dan MD (sol 700). Perbedaan dua aplikasi khusus MSC adalah penyelesaian dengan Marc Mentat akan menerapkan analisis aliran air kontinu (kondisi operasi) sedangkan penyelesaian dengan MD adalah untuk kondisi diskontinu (kondisi awal, terjadi *water hammer* dan sebagainya). Penyelesaian kontinu akan menerapkan pola-pola aliran seperti yang dikembangkan oleh Navier dan Stokes secara eksperimental sedangkan

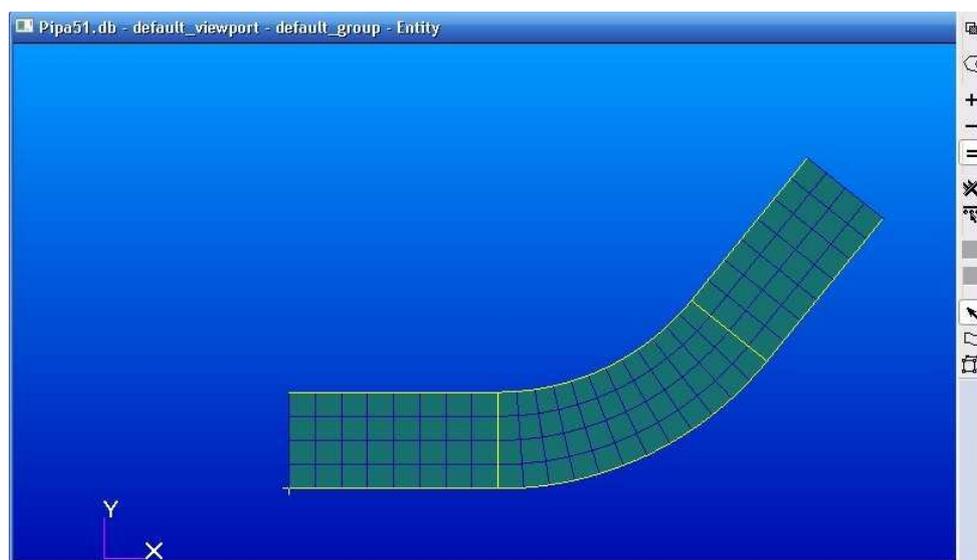
penyelesaian diskontinu merupakan penyelesaian dengan model eksperimental seperti yang dikembangkan oleh Euler. *The macneal-Schwendler Corporation (MSC)* sendiri merupakan program analisis elemen hingga yang dikembangkan oleh NASA (*National Aeronautics And Space Administration*) Amerika Serikat. Dalam penelitian ini metode numerik yang digunakan adalah penyelesaian dengan menggunakan Marc Mentat.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk analisis pada penelitian ini adalah metode numerik dengan pembuatan model elemen hingga. Sebagai data, dimensi yang digunakan adalah diameter dan panjang pipa *hot leg* seperti Tabel 1. Data sudut belokan pipa selain dari 50^0 merupakan data sudut belokan pipa yang umum digunakan pada industry perpipaan. Model pipa *hot leg* dibuat menggunakan media gambar MSC yang disebut Patran. Analisis yang dilakukan merupakan analisis bidang atau disebut analisis dua dimensi dengan asumsi bahwa arah x adalah sejajar sumbu pipa dan arah y adalah bergerak ke atas tegak lurus terhadap sumbu x dengan tidak ada air yang bergerak ke arah sumbu z. Setelah gambar terbentuk, selanjutnya di-*mesh* sehingga terlihat garis-garis segmentasi elemen seperti ditunjukkan pada Gambar 2 untuk sudut belok 30^0 . Gambar 2 dibuat dengan *software* MSC Patran

Tabel 1. Data input dimensional model pipa hot leg AP1000[7]

Sudut Belok	Diameter		Panjang			Jari-Jari Belokan (m)
	Dalam (m)	Luar (m)	Arah x (m)	Arah x,y (m)	Arah y (m)	
30^0	0,7874	0,9525	4,4495	2,8330	1,4165	1,7399
45^0	0,7874	0,9525	5,0363	2,8330	2,0032	1,7399
51^0	0,7874	0,9525	5,2368	2,8330	2,2038	1,7399
60^0	0,7874	0,9525	5,4865	2,8330	2,4536	1,7399
70^0	0,7874	0,9525	5,8664	2,8330	2,8330	1,7399



Gambar 2. Pipa 2D dengan sudut belok 30^0

Setelah model selesai dibuat, selanjutnya gambar di-*run* untuk memperoleh hasil gambar dengan ekstension *.dat. Selanjutnya gambar yang berekstensi *.dat dibaca dengan menggunakan

Marc Mentat. Setelah dibuka dengan Marc Mentat maka tampilan secara visual seperti terlihat pada Gambar 2. Data material pipa seperti sifat mekanik, *poisson rasio* dan sifat fisik material diberikan diberikan seperti pada Tabel 2. Data yang diberikan tersebut seperti data operasional PLTN AP1000.

Tabel 2. Sifat-sifat fisis dan sifat-sifat mekanis material pipa hot leg AP1000[7]

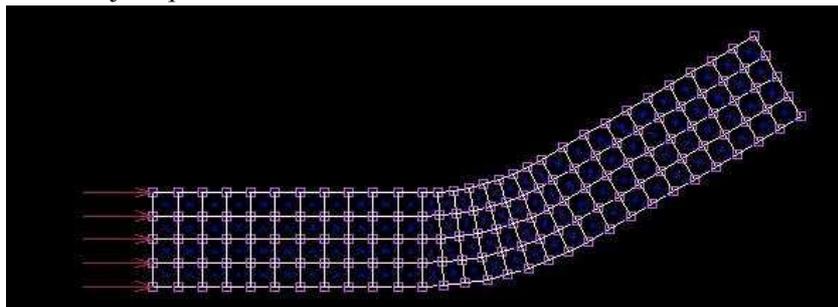
Jenis material pipa	SA376-TP316LN
Massa jenis (γ_{pipe})	8100 kg/m ³
Tegangan Yield (σ_v)	205 MPa
Koefisien termal ekspansi SA376-TP316LN (α) pada 343 ⁰ C	1,78 x 10 ⁻⁵ (m/m/ ⁰ C)
Modulus elastisitas (E) pada temp. ruang	193 GPa
Diameter dalam pipa <i>hot leg</i>	0,7874 m (31 in)
Diameter luar pipa <i>hot leg</i>	0,9525 m (37,5 in)

Untuk dapat melakukan analisis maka air di dalam pipa harus diberi data *input load* yang menunjukkan data pembebanan pipa. Oleh karena itu maka *Input* data kecepatan fluida, massa jenis air pada temperatur 316⁰C dengan tekanan 16,5 Mpa dan viskositas air pada kondisi yang sama dengan massa jenis fluida tersebut dimasukkan seperti pada Tabel 3. Data ini merupakan *input* beban (*load*) bagi material pipa. Oleh karena itu pemberian data *input* disertai pula arah garis gaya pembebanan seperti pada Gambar 3. Mula-mula garis aliran fluida masuk pipa ditunjukkan dengan garis-garis aliran kecepatan pada titik-titik masuk pipa.

Tabel 3. Sifat fisis air pendingin primer reaktor daya AP1000 pada pipa hot leg[6][7]

Fluida alir dalam pipa	Air dengan temperatur dan tekanan tinggi
Temperatur fluida	321 ⁰ C
Kecepatan air di dalam pipa <i>hot leg</i>	23,01 m/det
Massa jenis air pada tekanan 16,5 MPa dan temperatur 316 ⁰ C dan (γ_{fluid})	664,7 kg/m ³ (0,6647 kg/liter)
Viskositas air pada 316 ⁰ C dan 16,5 MPa	8,4 x 10 ⁻⁵ Ns/m ²

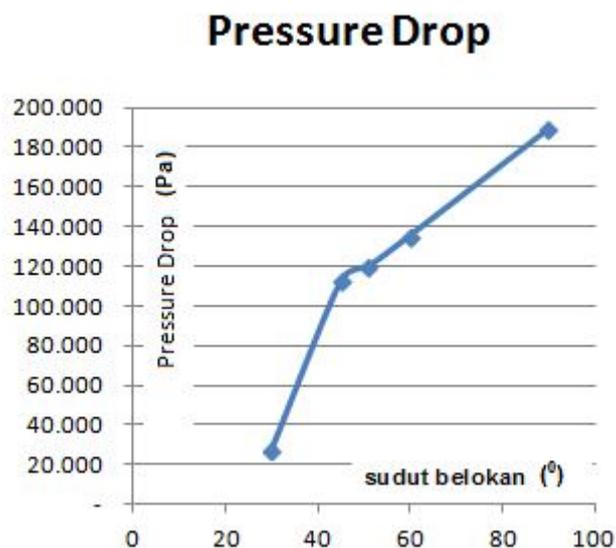
Garis selanjutnya adalah pada semua titik *joint* pipa diberi garis aliran air searah dengan garis yang pertama. Selain itu garis aliran air juga diberikan dalam arah tegak lurus dinding pipa pada titik-titik *joint* dinding pipa sebelah atas dan seterusnya hingga semua garis aliran menggambarkan kondisi nyata arah aliran fluida. Setelah semua data *input* diberikan, langkah selanjutnya adalah program analisis Marc Mentat dijalankan (*di-run*) sehingga dapat diperoleh hasil analisis perubahan tekanan akibat adanya belokan pipa khususnya tentang penurunan tekanan rata-rata (*pressure drop*) akibat belokan sebagaimana tujuan penelitian.



Gambar 3. Model 2D sudut belok 30⁰ setelah di mesh dengan garis aliran air masuk

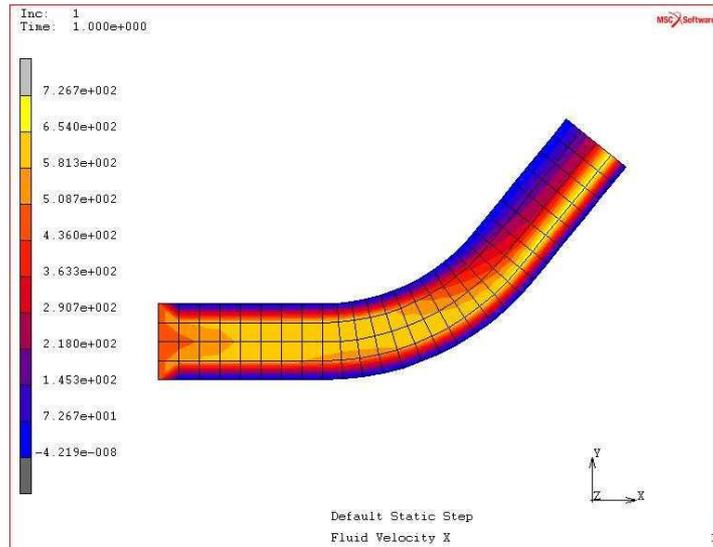
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis data *input* dengan menggunakan perangkat lunak Marc Mentat dapat diperoleh bahwa nilai perubahan tekanan (*pressure drop*) pada setiap perubahan sudut belokan pipa dengan luas penampang dan panjang pipa yang sama. *Pressure drop* aliran air yang masuk dan menumbuk dinding belokan pipa akan bergerak naik dengan semakin meningkatnya sudut belokan pipa. Dari hasil analisis diperoleh bahwa pada sudut belok 30° besar *pressure drop* adalah 27899,7 Pa (0,0278997 MPa). Pada sudut belokan 90° nilai *pressure drop* mencapai nilai terbesar yaitu 189.000 Pa. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa semakin besar sudut belokan pipa maka semakin besar pula *pressure drop* yang dialami oleh aliran air. Lebih lanjut *pressure drop* dan besar perubahan sudut digambarkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 4.

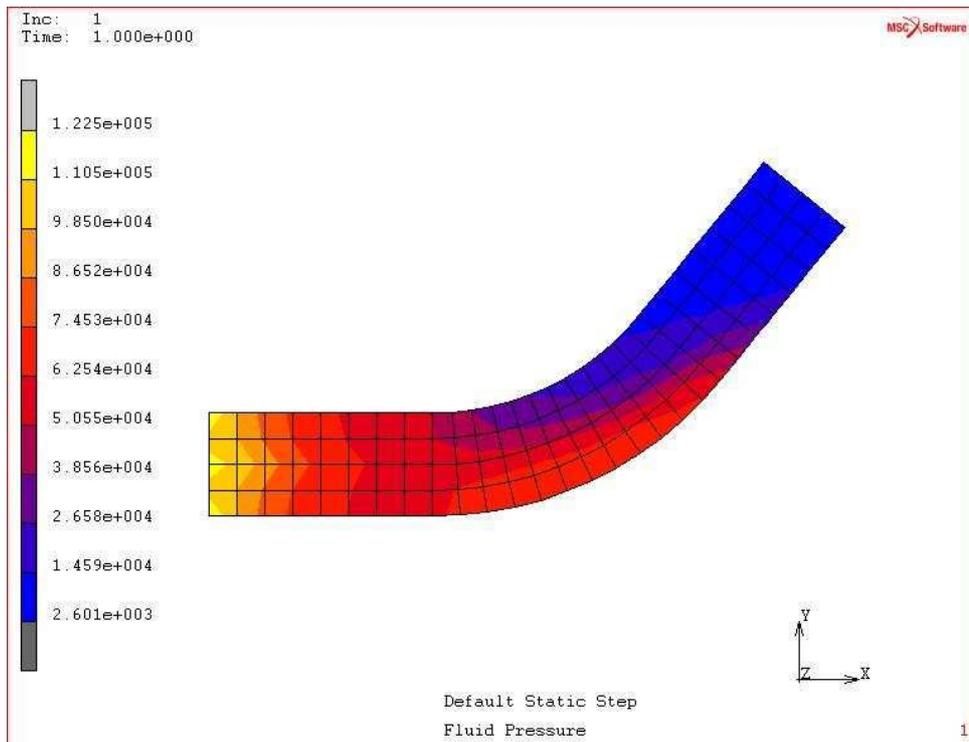


Gambar 4. Peningkatan *pressure drop* akibat kenaikan sudut belokan pipa

Secara visual perubahan *pressure drop* dan perubahan kecepatan pada setiap pergerakan air sepanjang pipa *hot leg* seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Sudut belokan pipa *hot leg* 51° . Kecepatan air dalam pipa 726,7 m/det. Pada saat melalui belokan pipa terjadi perubahan arah aliran yang menyebabkan adanya dua aliran yang berbenturan sehingga terbentuk pusaran yang ditunjukkan dengan beberapa perubahan warna pada Gambar 5. Perubahan kecepatan aliran air pada belokan turun hingga lebih dari separuh kecepatan aliran pipa sebelum belokan yaitu 363 m/det. Akibat gesekan yang terjadi antara air yang mengalir dengan dinding bagian dalam pipa yang juga ditambah dengan adanya belokan pipa menyebabkan terjadi *pressure drop* dinamis sebesar 119.899 Pa atau 1,2 bar. Hal menunjukkan bahwa terjadi peningkatan besar tekan dalam pipa dari tekanan statis 156 bar menjadi 157,2 bar (15,72 MPa). Distribusi tekanan dinamis dalam pipa akibat aliran air tersebut seperti pada Gambar 6.



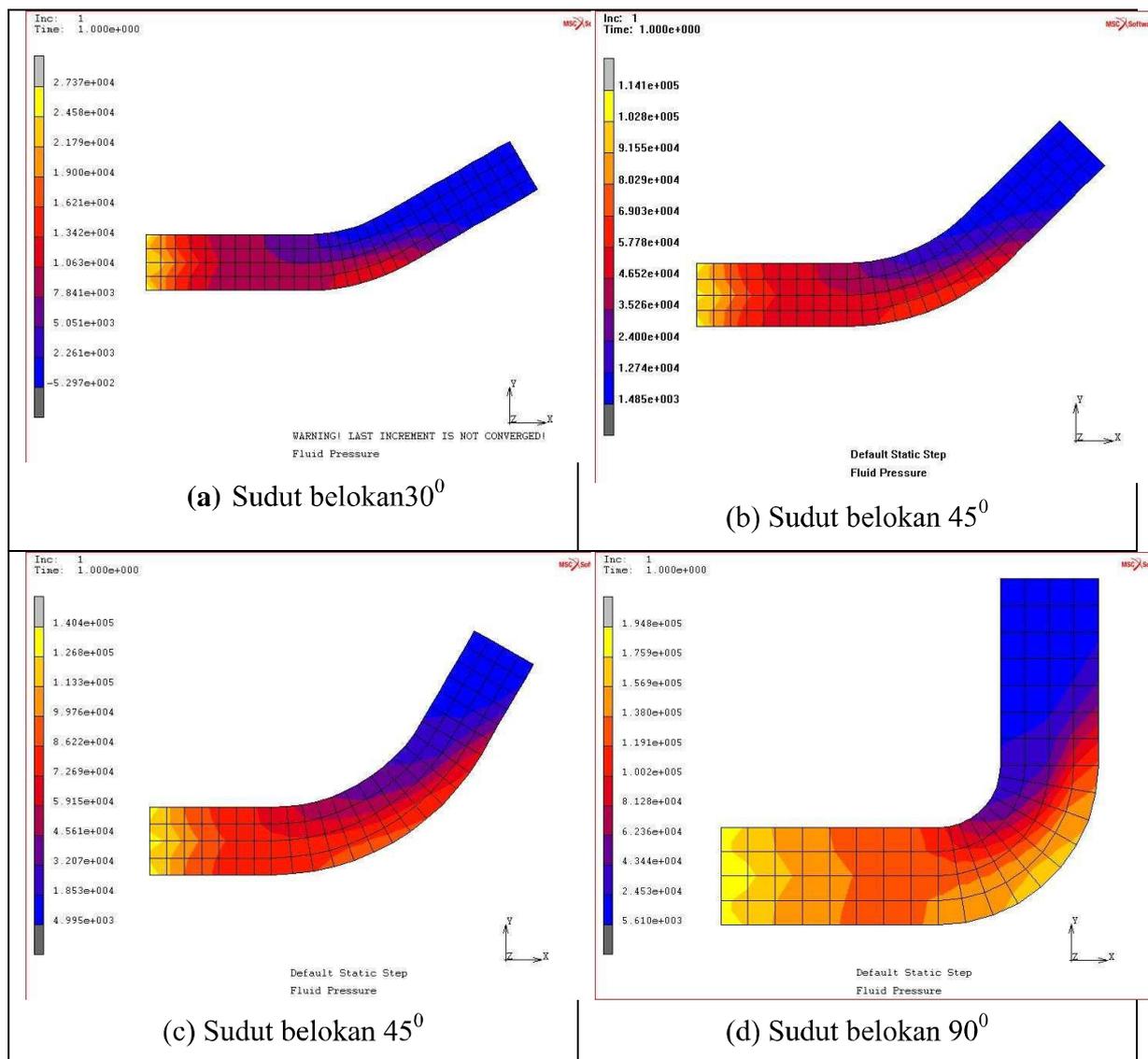
Gambar 5. Perubahan kecepatan aliran air dalam pipa dengan sudut belok 51°



Gambar 6. Distribusi tekanan dinamis dalam pipa *hot leg*

Bila dicermati lebih jauh berdasarkan grafik pressure drop yang terjadi mulai dari sudut belokan 30° , 45° , 51° , 60° dan 90° maka dapat terlihat bahwa pada sudut belok 45° , 51° dan 60° garis kurva yang terbentuk cenderung cukup landai dibanding antara sudut belok dari 30° ke 45° dan 60° ke 90° . Dengan kata lain pada sudut-sudut belok tersebut *pressure drop* yang terjadi relatif lebih stabil dibanding pada perubahan yang lainnya. Pada sudut 51° terlihat pula bahwa peningkatannya relatif kecil jika dikorelasikan dengan sudut belok 45° . Selain itu apabila dicermati lebih lanjut, pada setiap belokan pipa khususnya pada tampilan visual distribusi tekanan terlihat bahwa konsentrasi tekanan pada sudut belokan 30° , 45° , 60° dan 90° seperti pada Gambar 7, lebih fokus jika dibandingkan dengan

sudut belok 51° seperti pada Gambar 6. Konsentrasi tekanan yang terfokus pada suatu tempat sangat besar pengaruhnya terhadap tegangan yang terjadi pada material sebagai akibat adanya interaksi fluida dengan material (*structure*) pipa. Tentu saja analisis lebih lanjut menyangkut tegangan pada material pipa akibat interaksi struktur dengan fluida perlu dikaji lebih mendalam guna memastikan hal tersebut. Analisis-analisis lainnya juga perlu dikaji lebih jauh untuk lebih meyakinkan bahwa besar sudut 51° merupakan besar sudut belokan pipa yang cukup optimal bagi pipa *hot leg* dengan kondisi tekanan dan temperatur seperti pada Tabel 3.



Gambar 7. Distribusi tekanan dinamis pada pipa dengan belokan sudut 30° , 45° , 60° dan 90°

KESIMPULAN

Dari hasil analisis simulasi variasi belokan pipa dengan obyek pipa hot leg reaktor daya PWR AP1000 diperoleh bahwa *pressure drop* yang terjadi pada sudut belokan pipa 30° , 45° , 60° dan 90° cenderung lebih besar dibandingkan dengan sudut belok 51° . Selain itu, pada tampilan visual diperoleh bahwa pada sudut belok 51° hampir tidak terjadi konsentrasi tekanan secara terpusat pada satu titik tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa sudut 51° dapat dikatakan sebagai sudut yang cukup optimal.

DAFTAR PUSTAKA

1. http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design_cert/ap1000/dcd/Tier%202/Chapter%205/5-1_r15.pdf, tanggal 28 April 2012
2. Vinatom, Westinghouse AP1000™ Nuclear Power Plant, Information Submission to VINATOM, Westinghouse Non-Proprietary Class 3, Vietnam, 2009. p.8
3. Merle Potter C., and David Wiggert C., *Fluid Mechanics*; Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1997.
4. Nadir Aradaa, Marilia Piresb, and Ad'elia Sequeiraa, *Viscosity effects on flows of generalized Newtonian fluids through curved pipes*, *Computers and Mathematics with Applications* 53 (2007) 625–646
5. Zainudin, I Made Adi Sayoga dan I Made Nuarsa, Analisa Pengaruh Variasi Sudut Sambungan Belokan Terhadap *Head Losses* Aliran Pipa, (2012), hal 14 - 22 [http://ejournal.ftunram.ac.id/FullPaper/Analisa%20Pengaruh%20Variasi%20Sudut%20Sambungan%20Belokan\(14-22\).pdf](http://ejournal.ftunram.ac.id/FullPaper/Analisa%20Pengaruh%20Variasi%20Sudut%20Sambungan%20Belokan(14-22).pdf)
6. Frank M. White, *Fluids Mechanics*, fourth edition, McGraw Hill, Boston, United States, 1997. Page 45, 227-229
7. J. A. Green and G. S. Anderson (Originator), AP1000 Pre-Construction Safety Report, Coolant System and Connected Systems Design Control Document, Westinghouse, UK, 2009. Page 5.1-10 to 5.1-15.

DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Anni Rahmat, PTRKN-BATAN)

- Apakah boundary condition pada ujung pemodelan diperhatikan $V = 0$?

JAWABAN : (Abdul Hafid, PTRKN-BATAN)

- Boundary condition pada dinding pipa pada kecepatan $V = 0$, artinya tidak ada yang terjadi pada dinding pipa.