

## KEADAAN TRANSIEN INSTALASI PEMIPAAN YANG DISEBABKAN OLEH POMPA SENTRIFUGAL MATI (TRIP OUT) (Hidraulik Transien pada Sistem Pendingin Pusat Tenaga)

Priyono Sutikno

Lab. Mesin Fluida Jur. Mesin - Institut Teknologi Bandung

### ABSTRAK

KEADAAN TRANSIEN INSTALASI PEMIPAAN YANG DISEBABKAN OLEH POMPA SENTRIFUGAL MATI (TRIP OUT) (Hidraulik Transien pada Sistem Pendingin Pusat Tenaga). Simulasi komputer dari kejadian transien dari suatu sistem pemipaan yang diakibatkan oleh pompa mati (trip out) dapat memperlihatkan fluktuasi *head* dan debit disuatu titik. Hasil simulasi ini dapat digunakan sebagai masukan untuk desain sistem pemipaan atau mensimulasi kejadian transien akibat peralatan lainnya bahkan sebagai bahan pertimbangan untuk menempatkan peralatan pengaman. Dengan demikian, pada desain sistem pendingin pusat tenaga (PLTU, PLTN, PLTP, PLTA), faktor keamanan sebaiknya dipilih berdasarkan dari kemungkinan terjadi keadaan yang berat serta risikonya.

### ABSTRACT

TRANSIENT PHENOMENA DURING A TRIP OUT OF CENTRIFUGAL PUMP IN A PIPING SYSTEM. A computer simulation of transient phenomena occurred in a piping system during a trip out of centrifugal pump showed head and debit fluctuations at a certain location. The results of this simulation could be applied as input data in designing a piping system or to simulate transient phenomena in any other systems as well as in considering the placement of safety tools/equipment. It can be concluded that the safety factors considered in a power plant should be based on the occurrence probability of major events and their corresponding risks.

### PENDAHULUAN

Dalam rangkaian kerja pompa yang normal selama saat menjalankan pompa (Start-Up), katup keluaran (discharge) selalu dijaga dalam keadaan tertutup penuh, untuk mengurangi pemakaian daya listrik. Sesudah mencapai putaran kerja (rated speed), katup dibuka secara perlahan. Sebaliknya, pada saat akan mematikan pompa katup ditutup terlebih dahulu secara perlahan-lahan kemudian daya listrik dimatikan. Kejadian transien akibat dari kedua cara menjalankan dan mematikan di atas telah dapat dianalisis dengan baik, dimana pada saat pembukaan katup atau penutup katup, pompa tetap berjalan pada kecepatan konstan selama keadaan transien di dalam sistem pemipaan. Jika pompa tidak dijalankan dan dimatikan sesuai dengan cara di atas, maka metode analisis transien di bawah ini yang sebaiknya digunakan.

Kejadian transien yang disebabkan oleh keadaan darurat operasi pompa (misalnya tiba-tiba daya listrik hilang) biasanya sangat jelek keadaannya, dimana sistem pemipaan mengalami keadaan tekanan negatif maupun positif.

Kehilangan daya listrik, kecepatan pompa berkurang. Dan inersia pompa biasanya lebih kecil dibandingkan dengan cairan yang dipompakan. Karena aliran dan *head* pompa berkurang, pada pipa keluaran gelombang tekanan negatif merambat kearah hilir. Sebaliknya pada pipa isap gelombang positif merambat kearah hulu. Aliran pada pipa keluaran secara cepat terhenti dan berbalik kearah pipa isap walaupun putaran pompa masih dalam arah normal. Dalam keadaan ini pompa beroperasi pada zona disipasi energi. Akibat aliran balik pompa, putaran pompa menurun dengan cepat lalu berhenti dan putaran berbalik. Akhirnya ia beroperasi sebagai turbin yang putarannya semakin tinggi hingga mencapai putaran liar (runaway speed). Dengan penambahan kecepatan putar, aliran balik berkurang karena tercekik (Chocking effect) dan gelombang tekanan positif dan negatif terbentuk pada pipa isap dan pipa keluaran. Jika sistem pemipaan, yang karena kejadian transien tersebut tekanannya turun hingga tekanan uap jenuhnya, maka terjadi penguapan dan pembentukan kantung gas, yang memisahkan



antara dua cairan. Jika pada saat lainnya terjadi tekanan positif yang berlebihan, maka akan terjadi penyatuan antara dua kolom cairan. Kejadian di atas dapat dimodelkan dan diteliti.

Model matematika keadaan transien sistem pemipaan dan pompa.

Keluaran pompa sentrifugal tergantung

$$\theta = \arctan \frac{\alpha}{v} \quad (4)$$

dan kurva karakteristik antara  $\theta$  dan  $h/(\alpha^2 + v^2)$ . Dengan definisi di atas, maka harga  $\theta$  terbatas antara  $0^\circ$  sampai dengan  $360^\circ$  yang meliputi keempat zona operasi. Pada Tabel 1 dapat dilihat zona operasi pompa.

Tabel 1. Zona operasi pompa

Zona Operasi	Tanda		Harga $\theta$
	$v$	$\alpha$	
Pompa	+	+	$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
Disipasi energi	-	+	$90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$
Turbin	-	-	$180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$
Disipasi energi pada turbin	+	-	$270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$

dari kecepatan  $N$  dan head  $H$  sedangkan perubahan kecepatan tergantung dari torsi, dan kombinasi dari inerti pompa, motor dan cairan yang terbawa di dalam impeler. Jadi, terdapat empat variabel,  $Q$ ,  $H$ ,  $N$  dan  $T$  yang menyatakan model matematik dari pompa. Kurva karakteristik pompa menunjukkan hubungan dari keempat variabel di atas, yang dapat dinyatakan kedalam persamaan  $H = H(Q, N)$  yang memudahkan penggunaannya dengan komputer.

Data dari prototipe didapat dengan menggunakan hukum kesebangunan dari model tes.

$$\frac{H}{N^2} = \text{Konstan}; \frac{N}{Q} = \text{Konstan} \quad (1)$$

Persamaan 1 dapat ditulis dalam bentuk tanpa dimensi dengan menggunakan harga dari kondisi kerja, berdasarkan definisi variabel tak berdimensi di bawah ini :

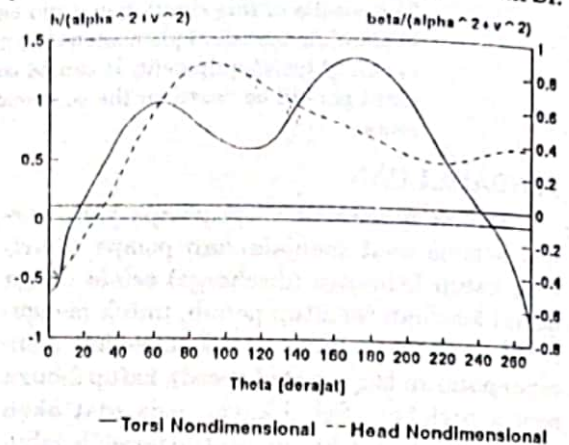
$$v = \frac{Q}{Q_R}; h = \frac{H}{H_R}; \alpha = \frac{N}{N_R}; \beta = \frac{T}{T_R} \quad (2)$$

Pada definisi di atas,  $T$  = torsi dan indek  $R$  menyatakan harga pada titik kerja. Berdasarkan persamaan 1 dan 2, dapat ditulis

$$\frac{h}{\alpha^2} = \text{Konstan}; \frac{\alpha}{v} = \text{Konstan} \quad (3)$$

(Jika  $\alpha$  menuju nol di dalam daerah operasinya,  $h/\alpha^2$  menuju tak berhingga, untuk menghindari hal ini, dapat digunakan  $h/(\alpha^2 + v^2)$ ). Tanda  $\alpha$  tergantung dari zona operasi. Untuk menghindari daerah operasi yang mempunyai harga  $v = 0$ , maka didefinisikan variabel:

Demikian pula dengan kurva karakteristik Torsi di plot  $\beta/(\alpha^2 + v^2)$  dan  $\theta$ . Kurva Gambar 1 merupakan karakteristik pompa yang mempunyai kecepatan spesifik 25 dalam satuan SI.



Gambar 1. Karakteristik head dan torsi non dimensional untuk pompa dengan  $N_s = 25$

Persamaan kondisi batas di pompa

Untuk menggunakan kurva-kurva pada Gambar 1 model matematik, titik diskrit dapat disimpan pada memori komputer dari interval  $\theta = 0$  hingga  $\theta = 360$ . Setiap segmen dari dua buah titik dari kurva karakteristik dapat didekati oleh garis lurus. Jika titik kurva yang disimpan cukup memadai, maka kesalahan yang disebabkan oleh pendekatan garis dapat diabaikan.

Anggap perhitungan melanjutkan perhitungan ke  $i$ , dengan variabel  $\alpha$ ,  $v$ ,  $h$  dan  $\beta$  diketahui pada awal langkah, dan akan dicari varia-

bel di atas pada langkah berikutnya. Nyatakan variabel yang dicari adalah  $\alpha_p$ ,  $v_p$ ,  $h_p$  dan  $\beta_p$ . Untuk menentukan harga variabel tersebut, terlebih dahulu, ditentukan persamaan segmen kurva karakteristik pompa yang berhubungan dengan  $\alpha_p$  dan  $v_p$ . Jika harga variabel belum diketahui, maka dimisalkan harga awalnya, lalu diekstrapolasi pada waktu lanjutan.

$$\alpha_e = \alpha_1 + \Delta \alpha_{i-1}; v_e = v_1 + v_{i-1} \quad (5)$$

$\alpha_e$  dan  $v_e$  merupakan harga estimasi pada langkah ke  $i$ , sedangkan  $\alpha_1$  dan  $v_1$  adalah harga yang diketahui pada langkah ke  $1$  dan  $\Delta \alpha_{i-1}$  dan  $v_{i-1}$  merupakan variasi variabel selama langkah  $(i-1)$ . Sementara kecepatan pompa dan debit keluaran berubah secara perlahan, ekstrapolasi ini cukup akurat, jika langkah waktu  $\Delta t$  kecil. Dengan jalan yang sama kita dapat menentukan persamaan dari torsi maupun  $head$  dengan ekstrapolasi garis lurus [1,2].

$$\frac{h_p}{\alpha_p^2 + v_p^2} = a_1 + a_2 \arctan \frac{\alpha_p}{v_p} \quad (6)$$

$$\frac{\beta_p}{\alpha_p^2 + v_p^2} = a_3 + a_4 \arctan \frac{\alpha_p}{v_p} \quad (7)$$

$a_1$  dan  $a_2$ ,  $a_3$  dan  $a_4$  suatu konstanta garis lurus.

Dengan mengacu pada Gambar 2, persamaan di bawah ini dapat ditulis sebagai  $head$  total pada pompa [2].

$$H_{P_{i,1}} = H_{suc} + H_p - \Delta H_{pv} \quad (8)$$

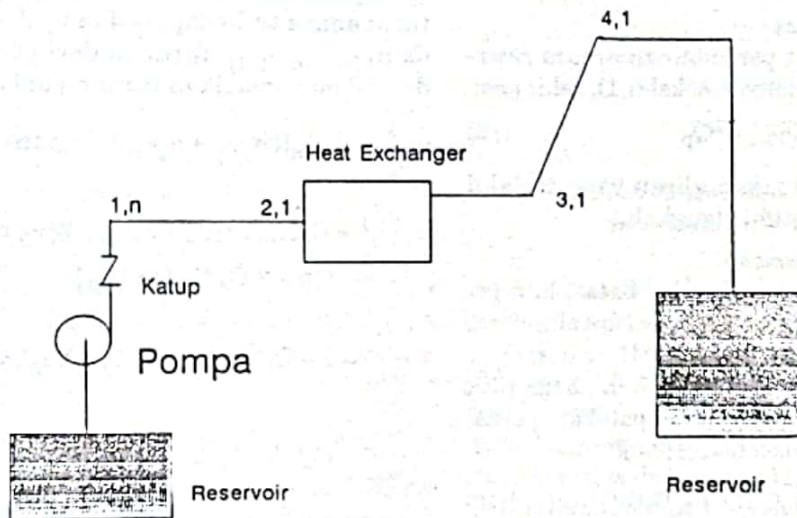
$H_{suc}$  = tinggi dari permukaan air pada bagian isap pompa di atas datum.  $H_p$  =  $head$  pompa pada ujung pada langkah waktu, dan  $\Delta H_{pv}$  = kerugian  $head$  di katup keluaran (discharge valve). Catatan, karena  $head$  kecepatan pada bagian keluaran kecil, maka tidak diperhitungkan pada persamaan 8. Kerugian  $head$  diberikan oleh persamaan [1,2,3,4]

$$\Delta H_{pv} = C_v Q_{P_{i,1}}^2 = C_v Q_{P_{i,1}} |Q_{P_{i,1}}| \quad (9)$$

$C_v$  = koefisien kerugian  $head$  pada katup. Pada persamaan di atas perkalian Variabel  $Q_{P_{i,1}}$  dengan harga mutlakanya, adalah untuk memperhitungkan aliran balik.

#### Persamaan diferensial dari massa yang berputar

Torsi untuk mempercepat sistem yang berputar adalah sama dengan perkalian percepatan sudut dengan momen inersia polar sistem. Tetapi tidak ada torsi luar yang bekerja pada pompa yang mengalami kehilangan daya, sehingga torsi yang diakibatkan oleh perlambatan, dapat ditulis sebagai:



Gambar 2. Instalasi pendingin



$$T_m = WR^2 \frac{d\omega}{dt}, T = WR^2 \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} \quad (10)$$

$WR^2$  = Kombinasi inersia polar dari impeler, motor, poros dan fluida yang terbawa di dalam impeler,  $N$  = putaran pompa rpm. Berdasarkan persamaan 2 dan 10, maka dapat ditulis :

$$\beta = WR^2 \frac{2\pi}{60} \frac{N_R}{T_R} \frac{d\alpha}{dT} \quad (11)$$

$T_R = 60 \gamma H_R Q_R / (2 \pi N_R \eta_R)$  dan  $\gamma$  = berat jenis dari fluida dan  $\eta_R$  = efisiensi pompa pada kondisi kerja. Dengan menggunakan harga rata-rata dari  $\beta$  selama langkah waktu, persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk beda hingga seperti [1,2]:

$$\frac{\alpha_p - \alpha}{\Delta t} = - \frac{60 T_R}{2\pi WR^2 N_R} \frac{\beta + \beta_p}{2} \quad (12)$$

Yang dapat disederhanakan sebagai:

$$\alpha_p - C_6 \beta_p = \alpha + C_6 \beta \quad (13)$$

$$\text{dimana } C = \frac{-15 T_R \Delta t}{\pi WR^2 N_R} \quad (14)$$

*Persamaan karakteristik untuk pipa keluaran (discharge pipe).*

Pipa isap pendek, memungkinkan pengaruh pipa isap diabaikan di dalam analisis berikut ini, [1,2,3,4]:

$$Q_{pi,1} = C_n + C_a H_{pi,1} \quad (14)$$

*Persamaan kontinuitas*

Tidak terdapat penimbunan antara *reservoir* pada sisi isap dengan seksi (i,1), sehingga:

$$Q_{pi,1} = Q_p \quad (15)$$

dengan  $Q_{pi,1}$  merupakan aliran yang melalui pompa dari setiap akhir langkah.

*Pemecahan dari persamaan*

Untuk membentuk kondisi batas, kita pecahkan persamaan 4 hingga 15 secara simultan. Dengan menghilangkan  $H_{pi,1}$ ,  $\Delta H_{pi,1}$  dan  $Q_{pi,1}$  dari persamaan dan menggunakan harga titik kerja  $Q_R$  dan  $H_R$  sebagai harga patokan, persamaan dapat ditulis sebagai [1,3,5]:

$$Q_p v_p = C_n + C_a H_{suct} + C_a H_{rh} - C_a C_v Q_R^2 |v_p| \quad (16)$$

dengan empat bilangan yang dicari  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $v_p$  dan  $h_p$ . Untuk mempermudah, masukan persamaan yang mengandung  $h_p$  dan  $\beta_p$ , dengan memasukkan persamaan 6, maka didapat per-

samaan yang hanya merupakan fungsi  $\alpha_p$  dan  $v_p$ , dan didapat:

$$F_1 = C_n H_R a_1 (\alpha_p^2 + v_p^2) + C_n H_R a_2 (\alpha_p^2 + v_p^2) \tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p} - Q_R v_p - C_a C_v Q_R^2 |v_p| + C_n + C_a H_{suct} = 0 \quad (17)$$

$$F_2 = \alpha_p - C_6 a_3 (\alpha_p^2 + v_p^2) - C_6 a_4 (\alpha_p^2 + v_p^2)$$

$$\tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p} - \alpha - C_6 \beta = 0 \quad (18)$$

Persamaan 17 dan 18 merupakan persamaan nonlinier yang dapat dipecahkan dengan metode Newton Raphson, yang menggunakan iterasi sukseksi.

Misalkan  $\alpha_p^{(1)}$  dan  $v_p^{(1)}$  sebagai estimasi awal dari variabel yang dicari, yang mungkin dapat disamakan dengan harga  $\alpha_e$  dan  $v_e$  yang didapat dari persamaan 6, sehingga harga pendekatan dari jawaban persamaan 17 dan 18 adalah:  $\alpha_p^{(2)} = \alpha_p^{(1)} + \delta \alpha_p$ ,  $v_p^{(2)} = v_p^{(1)} + \delta v_p$ .

$$\delta \alpha_p = \frac{F_2 \frac{\partial F_1}{\partial v_p} - F_1 \frac{\partial F_2}{\partial v_p}}{\frac{\partial F_1}{\partial \alpha_p} \frac{\partial F_2}{\partial v_p} - \frac{\partial F_1}{\partial v_p} \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_p}} \quad (19)$$

$$\delta v_p = \frac{F_2 \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_p} - F_1 \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_p}}{\frac{\partial F_1}{\partial v_p} \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_p} \frac{\partial F_2}{\partial v_p}} \quad (20)$$

Pada persamaan 19 dan 20, fungsi  $F$  dan  $F$  dan turunannya terhadap  $\alpha_p$  dan  $v_p$  dievaluasi pada  $\alpha_p^{(1)}$  dan  $v_p^{(1)}$ . Turunan dari persamaan 17 dan 18 menghasilkan turunan di bawah ini:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \alpha_p} = C_n H_R [2a_1 \alpha_p + a_2 v_p + 2\alpha_p \tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p}] \quad (21)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial v_p} = C_n H_R [2a_1 v_p + a_2 \alpha_p + 2v_p \tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p}] - Q_R - 2 C_a C_v Q_R |v_p| \quad (22)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \alpha_p} = 1 - C_6 [2a_3 \alpha_p + a_4 v_p + 2\alpha_p \tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p}] \quad (23)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial v_p} = C_6 [-2a_3 v_p + a_4 \alpha_p + 2v_p \tan^{-1} \frac{\alpha_p}{v_p}] \quad (24)$$

Jika  $|\delta \alpha_p|$  dan  $|\delta v_p|$  lebih kecil dari batas toleransi (misalnya 0,001), maka  $\alpha_p$  dan  $v_p$  dianggap sama dengan  $\alpha_p$  dan  $v_p$ , dan prosedur di atas diulangi hingga batas toleransi tercapai. Jika, segmen karakteristik yang digunakan be-

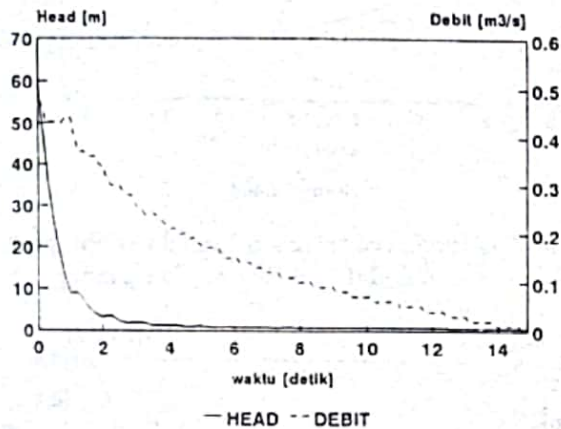
nar adanya, maka  $h_p$  dan  $\beta_p$  dapat dicari dari persamaan 6 dan 7 dan  $H_p$  dan  $Q_p$  dari persamaan 3 dan  $H_{pi,1}$  dan  $Q_{pi,1}$ .

Harga harga  $\alpha_e$  dan  $v_e$  diawali untuk langkah berikutnya (misalkan  $\alpha = \alpha_p$  dan  $\beta = \beta_p$ ), dan jawaban pendekatan menuju ke jawaban sebenarnya, bersama langkah waktu. Untuk menghindari iterasi yang berlebih, maka pada prosedur diberi pembatas dan penghitungan iterasi, demikian pula pembatas ini untuk menghindari terjadinya iterasi yang divergen.

Pada awalnya, pompa beroperasi pada titik kerjanya, kejadian transien disebabkan oleh karena pompa kehilangan daya.

Karakteristik pompa untuk  $N_g = 25$  (sistem SI) yang digambarkan pada Gambar 1 digunakan dalam analisis ini.

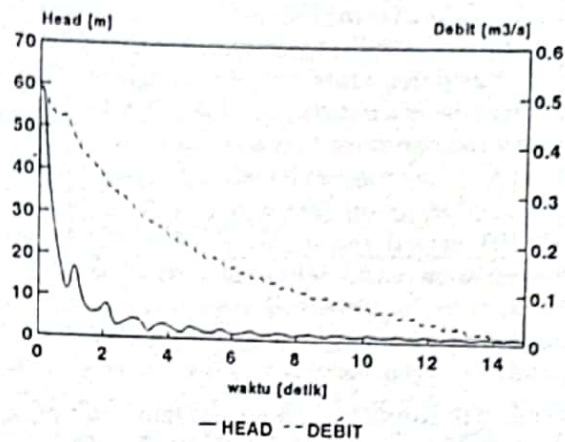
Pada titik kerjanya, kecepatan dan kapasitas pada sisi isap dan discharge sama dengan keadaan setimbang. Ketika daya hilang, kondisi transien terjadi dan dihitung dengan program komputer seperti pada hasil di Gambar 3 sampai dengan Gambar 14.



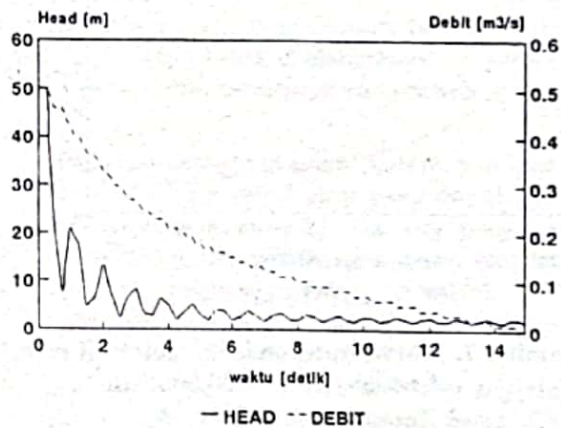
Gambar 3. Kurva transien head dan debit pipa no.1 nodal 1,  $WR^2=16,85 \text{ kg/m}^2$

#### DISKUSI HASIL SIMULASI KOMPUTER

Pada simulasi komputer, pompa bekerja pada keadaan setimbang pada  $H = 60 \text{ m}$ ,  $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{detik}$ , putaran 1100 rpm dan efisiensi 84%. Parameter yang divariasikan hanya inersia massa yang berputar atau  $WR^2$  antara lain 1,85; 16,85 dan 86,85  $\text{kg/m}^2$ , hasilnya masing-masing terlihat pada Gambar 3 sampai dengan 14. Pada sistem pemipaan dengan momen inersia 86,85



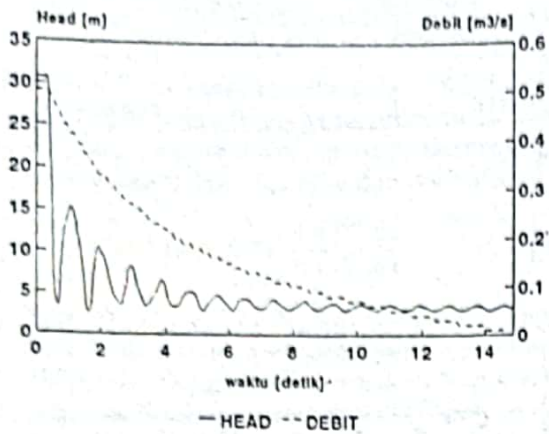
Gambar 4. Kurva transien head dan debit pipa no.2 nodal 1,  $WR^2=16,85 \text{ kg/m}^2$



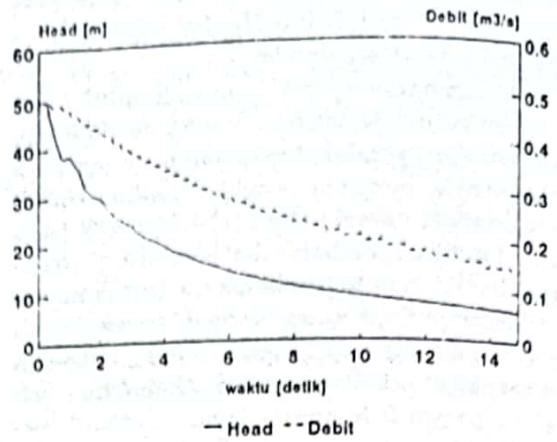
Gambar 5. Kurva transien head dan debit pipa no.3 nodal 1,  $WR^2=16,85 \text{ kg/m}^2$

$\text{kg/m}^2$  tidak terjadi gejala head yang berarti, sedangkan pada inersia fluktuasi terlihat jelas (Gambar 5 dan 6) dengan fluktuasi sebesar 13 m antara  $t = 1$  dan 2 detik walaupun tidak terdapat head negatif. Jika inersia pompa  $WR^2 = 1,65 \text{ kg/m}^2$  digunakan maka terdapat fluktuasi head yang tinggi pada Gambar 11, nodal 1,  $t = 1$  detik  $h = -10 \text{ m}$  dan pada Gambar 12, 13 dan 14, fluktuasi head melebihi -10 m, yang menandakan telah terjadinya penguapan dan pembentukan kantung gas. Fluktuasi head disertai dengan fluktuasi debit sehingga pada akhirnya kemungkinan terdapat aliran balik yang menyebabkan *hammering*.

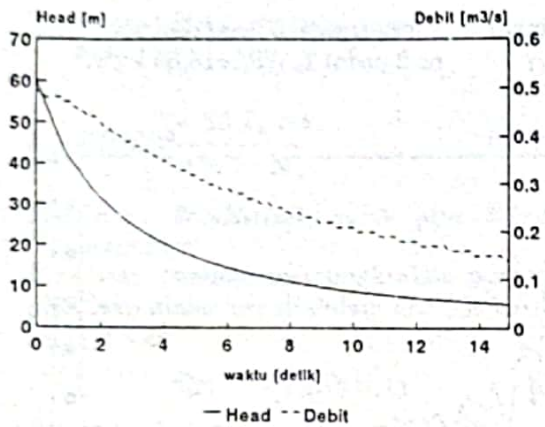




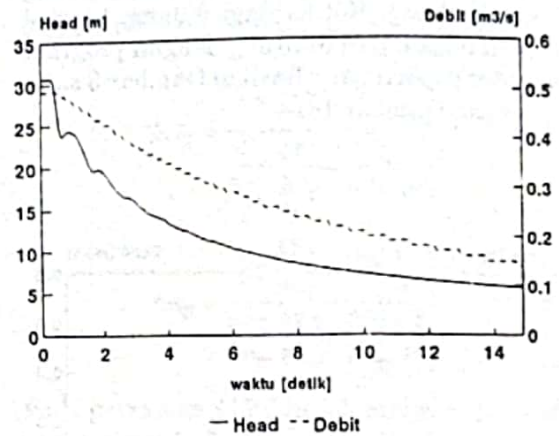
Gambar 6. Kurva transien head dan debit pipa no.4 nodal 1,  $WR_2=16,85 \text{ kg/m}^2$



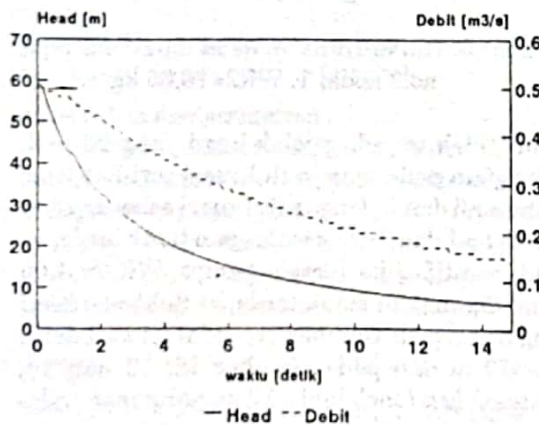
Gambar 9. Kurva transien head dan debit pipa 3 nodal 1,  $WR_2=86,85 \text{ kg/m}^2$



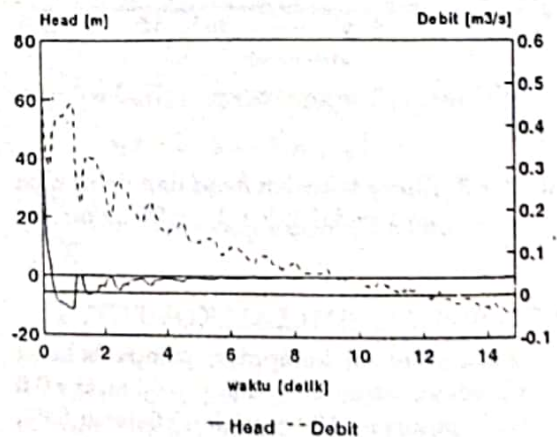
Gambar 7. Kurva transien head dan debit pipa 1 nodal 1,  $WR_2=86,85 \text{ kg/m}^2$



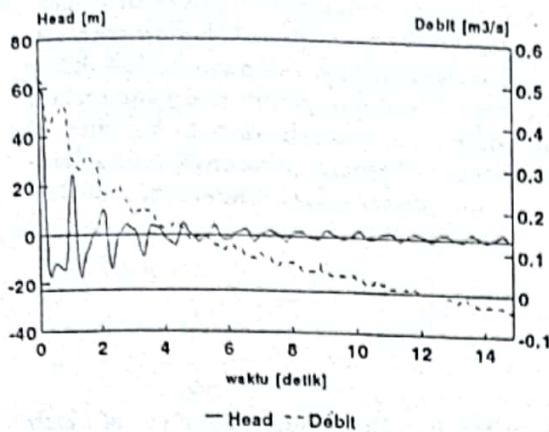
Gambar 10. Kurva transien head dan debit pipa 4 nodal 1,  $WR_2=86,85 \text{ kg/m}^2$



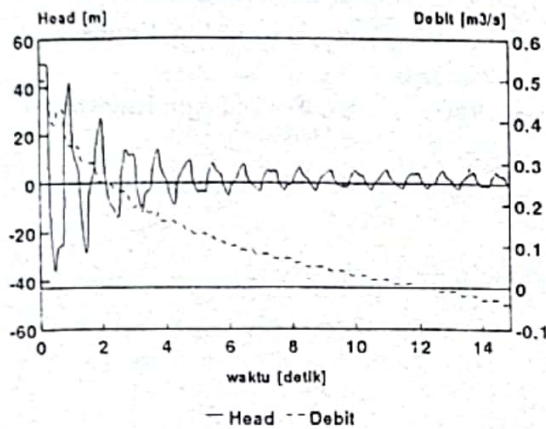
Gambar 8. Kurva transien head dan debit pipa 2 nodal 1,  $WR_2=86,85 \text{ kg/m}^2$



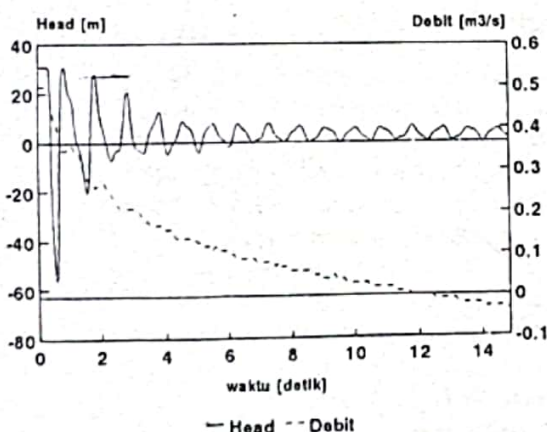
Gambar 11. Kurva transien head dan debit pipa 1 nodal 1,  $WR_2=1,85 \text{ kg/m}^2$



Gambar 12. Kurva transien head dan debit pipa  
2 nodal 1,  $WR_2 = 1,85 \text{ kg/m}^2$



Gambar 13. Kurva transien head dan debit pipa  
3 nodal 1,  $WR_2 = 1,85 \text{ kg/m}^2$



Gambar 14. Kurva transien head dan debit pipa  
4 nodal 1,  $WR_2 = 1,85 \text{ kg/m}^2$

## KESIMPULAN

Simulasi komputer dari kejadian transien dari suatu sistem pemipaan, akibat pompa mati dapat memperlihatkan fluktuasi head dan debit disuatu titik, sehingga dapat digunakan sebagai masukan untuk desain sistem pemipaan atau menyimulasi kejadian transien akibat peralatan lainnya, atau sebagai pertimbangan untuk menempatkan peralatan pengaman.

Melihat hasil simulasi, maka pada desain sistem pendingin pusat tenaga (PLTU, PLTN, PLTP, PLTA), setelah *layout* serta penentuan dimensi selesai dipilih, kejadian tekanan maksimum dan minimum dari sistem pemipaan pada berbagai kondisi operasi dapat dihitung dengan menggunakan prosedur yang dikemukakan di atas. Untuk mendapatkan keamanan desain, maka faktor keamanan yang besar dapat dipilih, tetapi hal ini belum tentu merupakan hal yang ekonomis. Dengan demikian, faktor keamanan sebaiknya dipilih berdasarkan dari kemungkinan terjadi keadaan yang berat serta risikonya.

Berdasarkan pengalaman terdapat tiga keadaan yang dapat diklasifikasikan sebagai keadaan normal, darurat atau bencana.

### Normal

Seluruh pengoperasian sistem pemipaan dalam keadaan normal atau yang dapat dikategorikan sebagai normal. Dimana peralatan dipasangkan pada sistem pemipaan (seperti, surge tanks, surge suppressors, air valve).

Kondisi operasi di bawah ini, dapat dinyatakan sebagai operasi normal.

1. Manual atau otomatis *start* atau *tripping* dari pompa dari seluruh daerah head. Jika terdapat lebih dari satu pompa, maka *tripping* bersamaan, tetapi *start* tidak bersamaan.
2. Jika katup cegah (check valve) dipasangkan dekat pompa, dan tertutup jika terdapat aliran balik.
3. Surge tank yang dipasangkan pada sistem pemipaan, dapat kemasukan udara.
4. Jika digunakan air chamber, maka dianggap mempunyai minimum udara selama daya hilang.

Dengan kondisi operasi di atas, maka dianggap tidak terjadi kolom pemisahan.

### Darurat

Operasi darurat pada sistem pemompaan, diakibatkan dari beberapa alat pengatur tekan-



an tidak bekerja selama kejadian kehilangan daya, termasuk:

1. Satu dari surge suppressor, surge tank atau relief valve tidak bekerja.
2. Penutupan dari check valve yang terlalu cepat akibat dari aliran balik.
3. Air inlet valve yang tidak bekerja.

Walaupun kecil kemungkinan terjadi kondisi di atas, faktor keamanan yang dianjurkan adalah dua, untuk menghindari terjadinya pipa pecah atau *colapse*.

### Bencana

Kondisi bencana diakibatkan seluruh peralatan tidak bekerja selama kejadian transien akibat kehilangan daya, dimana terjadi kecepatan pembukaan dan penutupan yang terlalu cepat, poros pompa patah. Karena kejadian di atas sangat kecil kemungkinannya, maka dianjurkan menggunakan faktor keamanan sedikit lebih besar dari satu.

### DAFTAR PUSTAKA:

1. Miyashiro, H., Waterhammer analysis of pump in parallel operation., Bull. Japan soc of Mech Engrs. (1962).
2. Miyashiro, H., Water level oscillation in surge tank when starting pumped storage power station, Proc International Assoc for Hydraulic Research, London (1963).
3. Kinno, H., Waterhammer analysis of pump system, Bull Japan Soc of Mech Engrs, (1967).
4. Wiggert, D.C., The effect of elbow restraint on pressure transients, Journal of Fluids Engineering, (1985).
5. Capozza, A., Maffio, A., Hydraulic Transient in Power Stations CISE Technologie Innovative (1987).