SIMULASI PEMBENTUKAN KAVITI DAN LONJAKAN HEAD AKIBAT ALIRAN TRANSIEN PADA SISTEM PEMIPAAN AIR PENDINGIN KONDENSOR PUSAT PEMBANGKIT ENERGI

Oleh Priyono Sutikno

Abstrak

Pemodelan numerik aliran transien pada instalasi kondensor meliputi pembentukan kaviti, kenaikan head akibat pecahnya kaviti gas, kecepatan rambat gelombang yang bervariasi sebagai fungsi dari kandungan gas dalam cairan. Penggunaan model numerik ini, dapat meramalkan daerah pembentukan kaviti gas dan lonjakan head. Hasil simulasi numerik dari kejadian transien akibat pompa kehilangan daya sesaat yang menunjukan bahwa kaviti gas terbentuk tidak hanya pada daerah yang paling tinggi dari instalasi pendingin kondensor Pusat Pembangkit Energi.

1. Pendahuluan :

Pembentukan kaviti akibat aliran transien, dapat terjadi pada instalasi pemipaan air pendingin kondensor, terutama pada daerah yang mempunyai elevasi tinggi dan jika tekanan turun hingga tekanan saturasi. Pecahnya kaviti dpat mengakibatkan lonjakan tekanan setempat.

Kecepatan penurunan dan kenaikan head pada peralatan, seperti katup, PRV atau pompa mempengaruhi volume kaviti yang terbentuk dan besarnya lonjakan head sesaat.

Pemodelan numerik pembentukan kaviti dan pelepasan gas dilakukan dengan balans masa yang memperhitungkan tekanan uap jenuh dan tekanan solubilitas gas. Kaviti terbentuk jika tekanan dibawah tekanan solubilitas gas sehingga gas yang larut pada cairan keluar. Kaviti akan bertambah besar, jika tekanan tetap pada tekanan solubilitas dan terjadi penguapan cairan jika tekanan menjadi tekanan uap jenuh.

Analisa aliran transien dapat menggambarkan kejadian kenaikan head, volume gas, laju aliran di suatu titik sehingga dapat diupayakan penjegahan terjadinya lonjakan head yang terlalu besar.

Penjegahan terjadinya kaviti akibat tekanan vakum dapat dilakukan dengan menambahkan katup laluan udara atau kamar udara yang penempatannya dapat di cari dari hasil simulasi.

2. Pemodelan pembentukan kaviti dan lonjakan head sesaat.

Model matematik yang digunakan dalam simulasi aliran transien merupakan model pendekatan makroskopik. Kejadian transien yang mengakibatkan terbentuknya kaviti gas diasumsikan pada bagian kecil didalam selang Δx, sehingga perhitungan pembentukan/pelepasan gas selama Δt, dinyatakan jika tekanan pada selang Δx tersebut lebih kecil dari tekanan saturasi atau tekanan uap jenuh.

Ditempat ini zat cair didalam pipa akan terpisah oleh gas menjadi dua kolom zat cair. Bagian yang berisi uap ini karena bertekanan rendah akan terisi kembali sehingga dua kolom zat cair yang terpisah akan menyatu kembali secara saling membentur. Maka ditempat ini terjadi lonjakan head.

Kaviti membesar sejalan dengan jumlah gas yang dilepaskan dan laju penguapan zat cair, pelepasan gas tergantung pada pelarutan gas yang dinyatakan oleh konstanta solubilitas gas. Volume gas yang dapat dilarutkan dinyatakan oleh Hukum Henry.

$$\frac{V_g}{V} = s \frac{H_s}{H_o} \qquad (1)$$

dengan s, koefisien solubilitas gas ; H_o head cairan ; H_s, head saturasi pelarutan gas. Jumlah masa gas yang terbentuk, jika tekanan cairan turun dibawah head saturasi H_s, maka jumlah gas yang terbentuk sebanding dengan s $(H_s - H_a)/H_o$.

Hubungan pendekatan gas yang dilepaskan oleh cairan dinyatakan oleh :

$$\dot{m} = C_k(H_s - H_a) \quad \text{jika } H_a < H_s \qquad (2)$$

dengan C_k merupakan koefisien solubilitas. $\dot{m}$ adalah laju aliran gas yang dilepaskan dari cairan persatuan volume cairan. Difusi gas didalam cairan merupakan proses yang lambat, dan hanya sejumlah kecil gas yang berperan selama transien, sehingga perubahan konsentrasi gas didalam zat cair hanya sedikit.

Selama pembentukan kaviti, jika Q_n adalah laju aliran masuk rata-rata kedalam kaviti dan Q laju aliran keluar selama selang waktu Δt, maka volume kaviti gas yang terbentuk

$$VAV = \Sigma (Q - Q_u)\, \Delta t \qquad (3)$$

Selama tekanan pada selang Δx lebih rendah dari tekanan uap jenuh dan/atau lebih rendah dari tekanan saturasi.

Seperti yang telah dikemukakan sebelumnya, perubahan konsentrasi gas selama proses transien sangat kecil. Kecepatan rambat gelombang pada campuran gas dan cairan, jika kandungan gas dibawah 1 %, maka $\rho = \rho_1$ dan kecepatan rambat gelombang dapat disederhanakan menjadi

$$a' = \sqrt{\frac{K_1/\rho_1}{1 + K_1 D/E_1 + m K_1 RT/p^2}} \qquad (4)$$

dengan p merupakan tekanan absolut, m masa gas yang bebas didalam satu satuan volume campuran.

Dua kolom air yang berbenturan, akibat pecahnya kaviti akan menaikan head sesaat dalam selang Δx.

$$\Delta H = \frac{a'}{2\, g\, A} (Q_u - Q) \qquad (5)$$

Walaupun kenyataannya proses impulsi kaviti gas tersebut, menimbulkan kaviti lainnya. Pendekatan (5) sudah dapat memberikan gambaran kenaikan head.

3. Metoda Interpolasi pada interval waktu Δt.

Metoda interpolasi dapat memperhitungkan perubahan kecepatan rambat gelombang persamaan (4) pada kejadian transien dan pemakaian metoda ini lebih mudah dibandingkan metoda beda hingga. Interpolasi dari waktu mengakibatkan peredaman numerik pada keadaan transien frekwensi tinggi. Karena kemudahan pemakaian metoda interpolasi tersebut, peredaman numerik yang dapat diatasi dengan pembagian selang yang lebih banyak, serta dapat mengikuti pemisahan kolom cairan

diseluruh potongan, maka metoda ini diterapkan untuk simulasi pembentukan kaviti. Berdasarkan gambar 1, tekanan absolut sebagai salah satu dari variabel bebas dinyatakan oleh

$$H_a = H_p - Z + \bar{H}$$

dengan H_p = head di titik P ; Z = ketinggian ; H = Head Tekanan atmosfir. Kecepatan rambat gelombang (4) ditulis

$$a' = \frac{a\,H_a}{\sqrt{C_3 + H_a^2}} \qquad C_3 = C_2\, m/\gamma^2 \qquad (6)$$

dengan

$$c = \frac{R\,T\,K_1}{1 + K_1\,D/E_1}$$

Persamaan kontinuitas dan momentum yang ditulis dalam head absolut dengan menggunakan metoda karakteristik.

$$\pm \frac{g\sqrt{C_3 + H_a^2}}{a\,H_a}\,\frac{d\,H_a}{dt} + \frac{dV}{dt} + g\sin\alpha + \frac{f\,V|V}{2D} = 0 \qquad (7)$$

dengan karakteristik

$$\frac{dx}{dt} = \pm \frac{a\,H_a}{\sqrt{C_3 + H_a^2}}$$

Jika kondisi courant dipenuhi a $\Delta t \le \Delta x$, maka untuk selang Δx dan bertolak pada gambar 2, integrasi di karakteristik c^+

$$\int_R^P \frac{\sqrt{C_3 + H_a^2}}{H_a}\,d\,H_a + \frac{a}{gA}\int_R^P dQ +$$

$$+ a\sin\alpha \int_R^P dt + \frac{f_a}{2gDA^2}\int_R^P Q|Q|dt = 0 \qquad (8)$$

didapat

$$\sqrt{C_3 + H_{ap}^2} - \sqrt{C_3} - \ln \frac{\sqrt{C_3} + \sqrt{C_3 + H_{ap}^2}}{H_{ap}} = C_p - B\,Q_4 \qquad (9)$$

dengan

$$C_p = \sqrt{C_3 + H_{a_R}^2} - C_3 \ln \frac{\sqrt{C_3 + H_{a_R}^2}}{H_{a_R}} + B Q_R - \Delta Z - R\,Q_R|Q_R|$$

dengan $B = \frac{a}{g\,A}$

persamaan karakteristik C^+ didekati dengan integrasi dan menganggap bahwa H_a berubah linier terhadap x maka,

$$a\,dt = \frac{\sqrt{C_3 + H_a^2}}{H_a}\,d\,H_a\,\frac{dx}{d\,H_a}$$

sehingga,

$$a\,(t_p - t_R) = \frac{x_p - x_R}{H_{aP} - H_{aR}} \int_{H_{aR}}^{H_{aP}} \frac{\sqrt{C_3 + H_a^2}}{H_a}\,d\,H_a \qquad (10)$$

atau

$$x_P - x_R = \frac{(H_{aP} - H_{aR})}{f_R(H_{aP}, H_{aR})}\,a\,\Delta t$$

dengan derajat interpolasi

$$\zeta = \frac{a'}{a} = \frac{H_{aP} - H_{aR}}{f_R(H_{aP}, H_{aR})}$$

Pada seksi ke i, iterasi diperlukan untuk memperoleh H_a, pertama dihitung masa gas yang bebas dengan menggunakan persamaan (2) dan menggunakan persamaan karakteristik c^+ maupun c^- untuk mendapatkan ζ_{i-1} dan ζ_i dengan

interpolasi didapat H_{aR} dan H_{as} serta H_{aP} secara simultan.

4. Penerapan

Kejadian transien pada awalnya adalah merupakan keadaan stedi.

Laju aliran dalam keadaan stedi dihitung sesuai dengan kurva karakteristik pompa dan kerugian - kerugian head. Sehingga Head absolut dinya - takan oleh

$$H_a = HH - Z - R\, Q_P|Q_P|$$

dimana HH adalah head pompa yang berubah terhadap waktu sesuai dengan trip-off.

Kejadian transien akibat pompa yang kehilangan daya dapat dianalisis sesuai dengan skema sistem pemipaan untuk air pendingin kondensor dari Pusat Tenaga Listrik.

La Casella menurut beberapa skenario berikut :

Kasus 1.

Kejadian transien terjadi pada saat pompa kehilangan daya selama 10 detik, sehingga head turun dari 60 ft hingga 33,5 ft pada 5 detik pertama dan kembali menjadi 60 ft pada 5 detik berikutnya.
Hasil perhitungan di titik 3 yaitu pada seksi sebelum kondensor yang bergerak 300 ft dari pompa yang ditunjukan pada gambar 4. Lonjakan head mencapai 98 ft, tetapi tidak terdapat pembentukan kaviti.

Pada titik 4 sejarak 400 ft dari pompa, yang merupakan kotak air dari kondensor. Dari gambar 5, lonjakan head tidak disertai dengan pembentukan kaviti, karena tekanan tidak lebih rendah dari tekanan saturasi. (H_{so} = 33,5 ft ; H_v = 2,95 ft).
Gambar 6 menunjukkan, kejadian transien pada titik 5, 600 ft dari pompa yang merupakan daerah sebelum siphon, terlihat bahwa kaviti terbentuk sebesar 120 ft^3 dan benturan kolom air menyebabkan kenaikan head sebesar 120 ft dan disusul dengan 40 ft kenaikan head kedua.

Kasus 2.

Pompa kehilangan daya sebelum waktu yang lebih pendek, yaitu 5 detik. Tetapi penurunan head lebih besar dari 60 ft hingga 10 ft.
Pada 7, walaupun belum terbentuk kaviti tetapi fluktuasi perubahan head yang drastis ini menyebabkan lonjakan-lonja - kan head serta debit yang besar.

Jika kita lihat pada gambar 8 dan 9 terlihat terdapat pembentukan kaviti, dan terdapat beberapa lonjakan head.

Gambar 8 menunjukkan lonjakan head pertama, kedua dan ketiga berturut-turut 200 ft pada detik ke 12, 350 ft pada detik ke 15 dan 100 ft pada detik ke 20. Pada kasus 2, pembentukan kaviti terdapat pada titik 4 dan 5, sedangkan pada titik 3 tidak terjadi pembentukan kaviti.

Kesimpulan

Hasil simulasi komputer menunjukkan bahwa kaviti terbentuk tidak selalu terjadi pada peralatan yang diletakkan dielevasi tinggi dan bergantung pula dari kejadian transien dari pompa pada bagian hilir.
Dengan adanya kaviti, akibat dari dua kolom air yang berbenturan terjadi kenaikan head sesaat yang tinggi, hal ini perlu diperhitungkan dalam menghitung kekuatan peralatan.

Pembentukan kaviti dalam sistem pendingin kondensor, berawal dari kondensor yang terbentuk keluar ke sisi siphon, sehingga peralatan seperti katup laluan udara (air vent valve) dapat dipasangkan pada kondensor untuk menghindari adanya penurunan tekanan hingga tekanan saturasi. Sebaliknya pengeluaran udara setelah keadaan tekanan normal perlu adanya penanganan khusus.

Nomenklatur :

a : kecepatan rambat gelombang fluida dalam pipa [ft/s]

a′ : kecepatan rambat gelombang campuran gas dan fluida didalam pipa [ft/s]

A : luas penampang [ft]

D : diameter pipa [ft]

E : Elastisitas pipa

e : tebal pipa [ft]

K_1 : kompresibilitas fluida

H : Head cairan [ft]

H_v : Head tekanan uap [ft]

H_a : Head absolut [ft]

Z : elevasi [ft]

HGL : Hydraulic grade line [ft]

Q : laju aliran rata-rata masuk seksi i [ft^3]

Q : laju aliran [ft^3]

C_k : koefisien salubilitas

H_s : Head tekanan saturasi

V : Volume [ft^3]

R : Konstanta gas

T : temperatur [$^\circ k$]

t : waktu [detik]

α : sudut elevasi

γ : berat jenis [lbf/ft^3]

R_p : tahanan aliran

VCAV : volume celah gas [ft^3]

S : salubilitas gas

m : masa gas

f : koefisien friksi

g : percepatan gravitasi

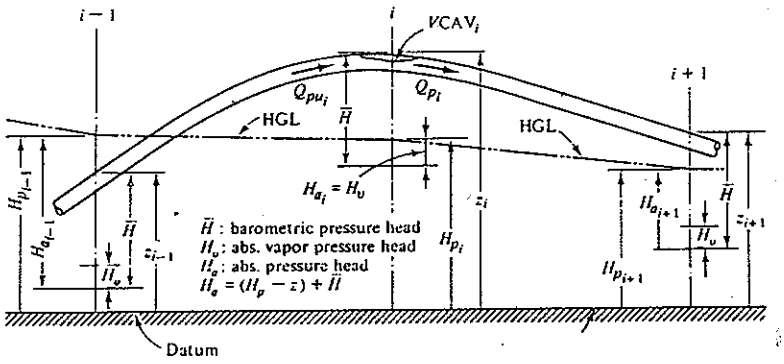
Referensi :

1). Bergeron
Water Hammer in Hydraulic and Wave surge in Electricity
John Wiley New York 1961

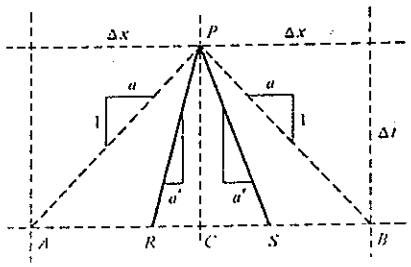
2). E Benyamin Wylie
Fluid Transients
Mc Graw-Hill New York 1978

3). Kranenburg.C
Gas release during transien Cavitation in Pipes
J Hyd.Div ASCE Oct 1974

4). Martin C.S
Entrapped air in pipelines
BHRA Sept. 1976

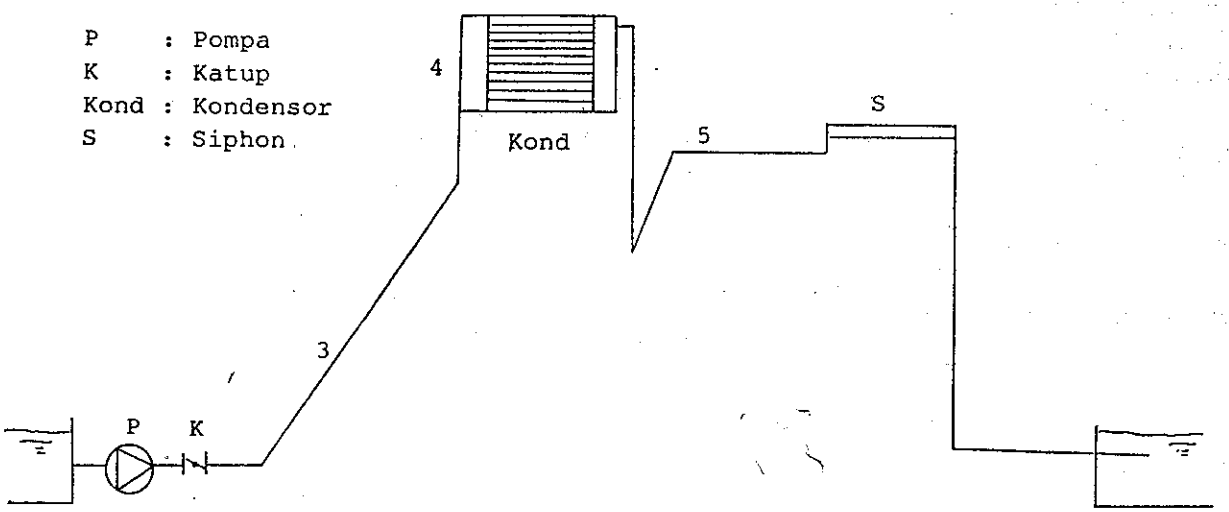


(gambar 1)



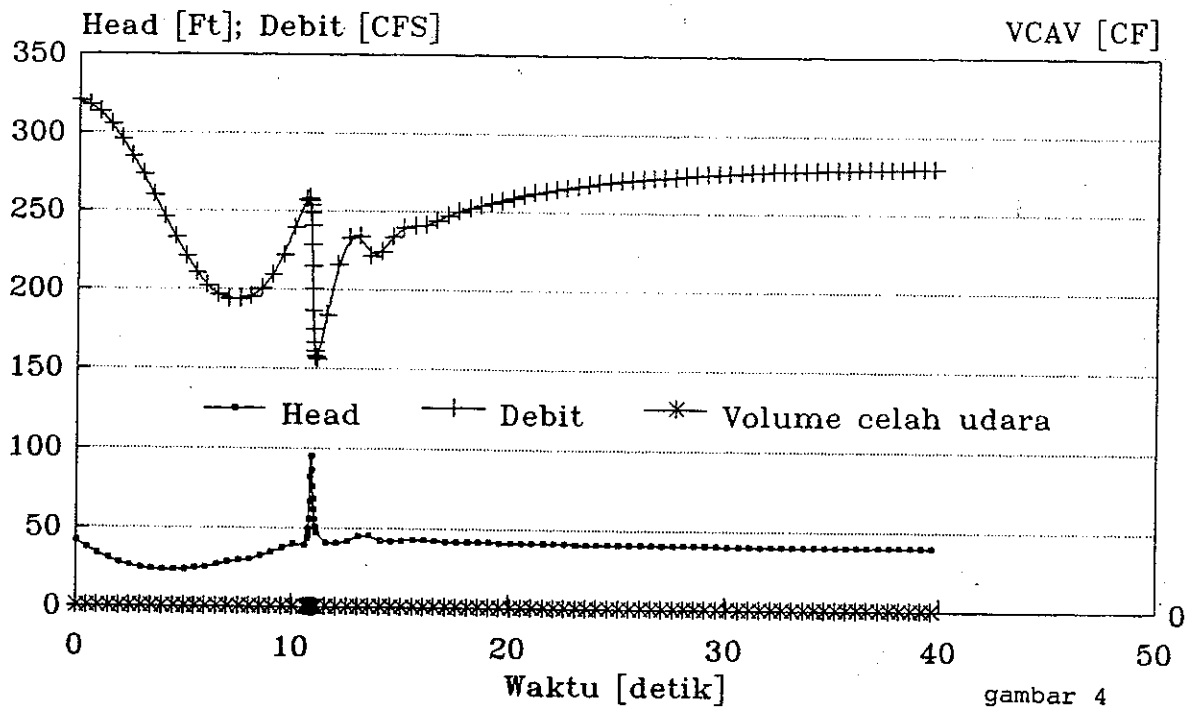
(gambar 2)

P : Pompa
K : Katup
Kond : Kondensor
S : Siphon



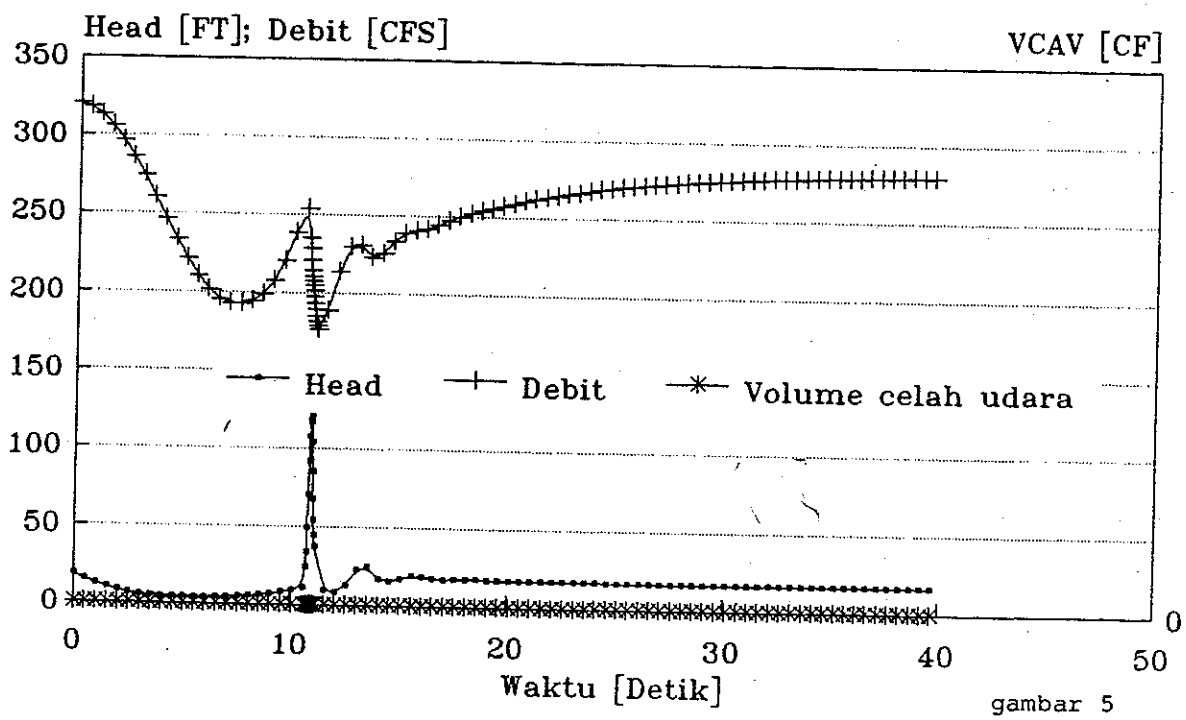
(Gambar 3)

Head, Debit, VCAV vs Waktu di titik 3
pompa kehilangan daya selama 10 detik



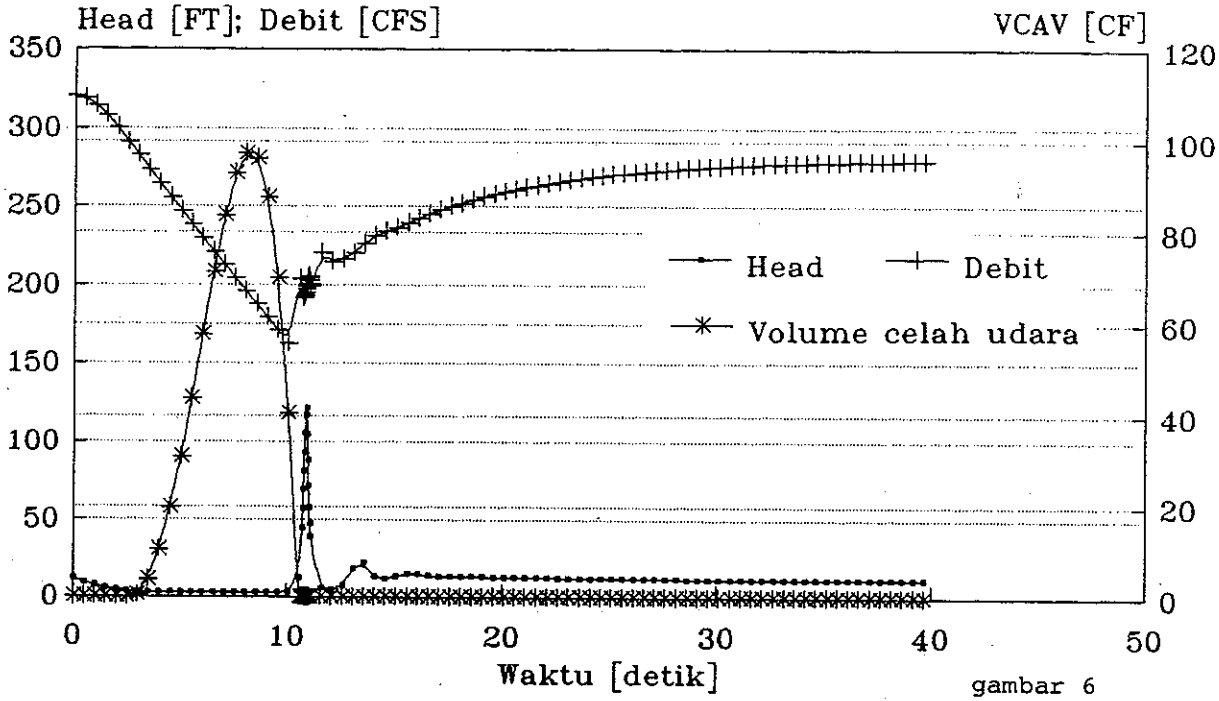
gambar 4

Head, Debit, VCAV vs Waktu dititik 4
pompa kehilangan daya selama 10 detik



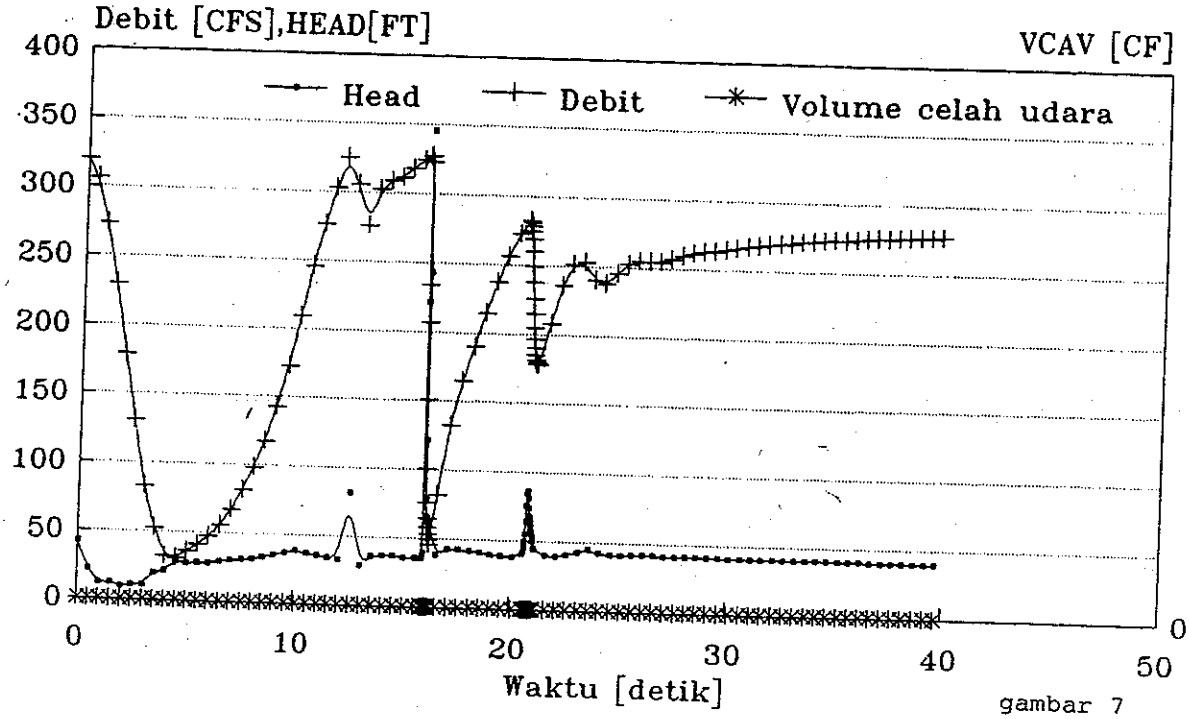
gambar 5

Head, Debit, VCAV vs Waktu di titik 5 pompa kehilangan daya selama 10 detik



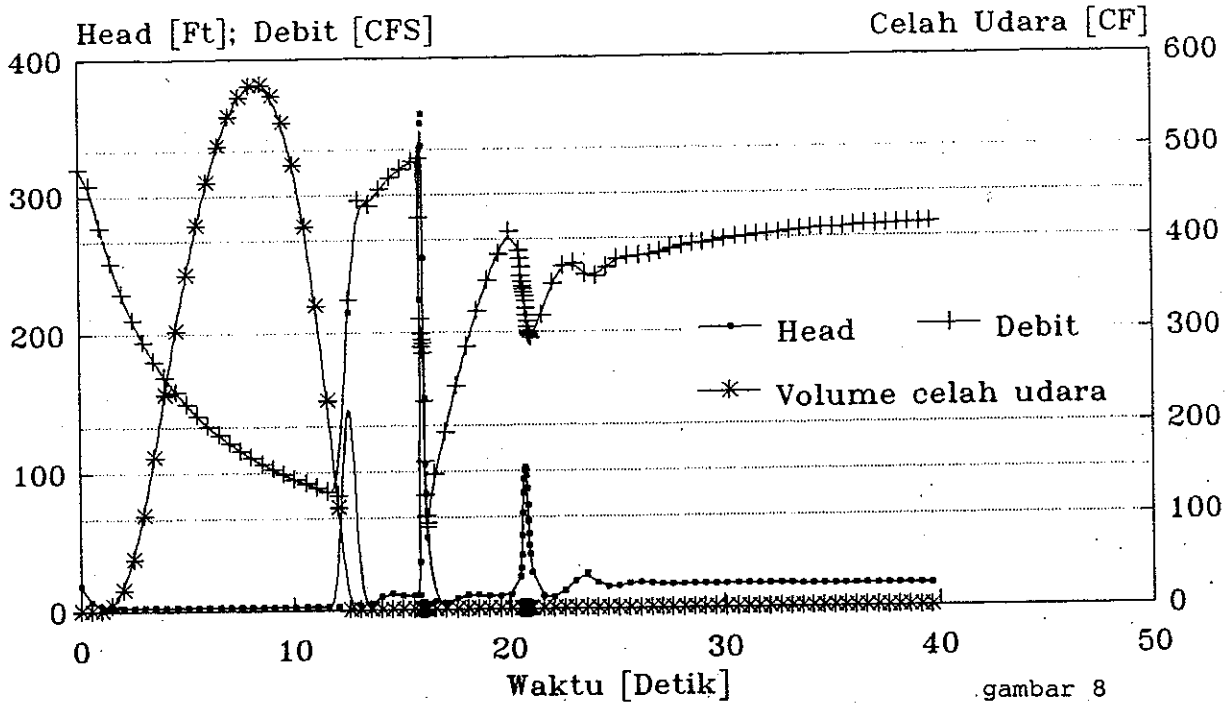
gambar 6

Head, Debit, VCAV vs Waktu di titik 3 pompa kehilangan daya selama 10 detik



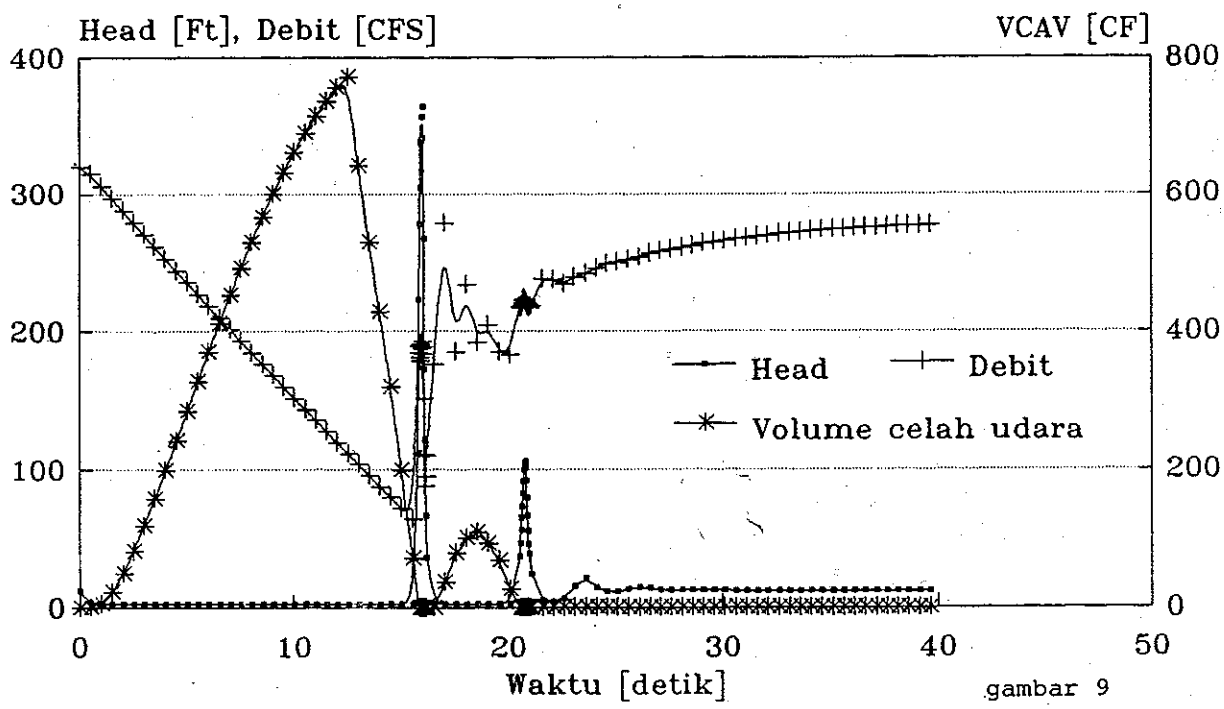
gambar 7

Head, Debit, VCAV vs Waktu di titik 4
pompa kelihangan daya selama 10 detik



gambar 8

Head, Debit, VCAV vs Waktu pada titik 5
pompa kehilangan daya selama 10 detik



gambar 9