

Analisis Penyebab Water Hammer pada Sistem Perpipaan

Rusli Ismail

Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar

Jl. Dg. Tata Raya, Kampus UNM Parangtambung Makassar 90224

Abstrak

Waterhammer mengacu pada fluktuasi yang disebabkan oleh peningkatan atau penurunan mendadak kecepatan aliran. Fluktuasi tekanan ini dapat memecahkan suatu pipa induk saluran air. Permasalahan potensial waterhammer harus dipertimbangkan dalam mengevaluasi disain saluran, dan suatu analisa surge (gelombang tekanan) harus dilakukan secara teliti pada setiap kejadian, untuk menghindari kegagalan pemakaian komponen yang mahal pada suatu sistem distribusi. Setiap perubahan besar disain sistem atau perubahan pengoperasian aliran seperti kebutuhan untuk laju aliran air yang lebih tinggi harus mempertimbangkan potensi terjadinya permasalahan waterhammer. Fenomena ini dan maknanya dalam kegiatan disain dan pengoperasian sistem penyediaan air belumlah dipahami secara luas, dengan mengacu kepada frekwensi dan jumlah kerusakan yang disebabkan oleh waterhammer.

I. Pendahuluan

Waterhammer (atau guncangan hidrolis) adalah peningkatan tekanan sesaat, yang terjadi pada suatu sistem penyediaan air ketika mengalami perubahan kecepatan atau arah aliran secara mendadak. Ketika suatu katup tertutup secara tiba-tiba, air yang mengalir di dalam suatu saluran akan terhenti, energi tekanan ditransfer ke katup dan dinding pipa. Gelombang tekanan kemudian timbul dan bergerak cepat di dalam sistem. Gelombang tekanan akan bergerak mundur sampai terhalang rintangan padat tertentu, kemudian maju, kemudian kembali lagi. Kecepatan gelombang tekanan ini sama dengan kecepatan rambat suara; sehingga gema gelombang tekanan itu bergerak bolak balik, sampai akhirnya teredam oleh kerugian gesekan pada dinding pipa. Orang yang tinggal / hidup di suatu rumah tua sudah terbiasa dengan gema gelombang tekanan itu bergema ketika suatu kran ditutup secara tiba-tiba. Ini adalah suatu efek *waterhammer*.

Bentuk *waterhammer* yang lebih kecil fluktuasinya disebut *surge*, yaitu

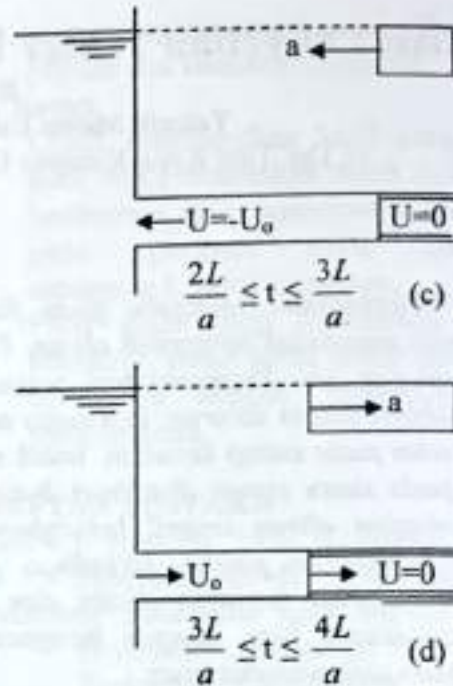
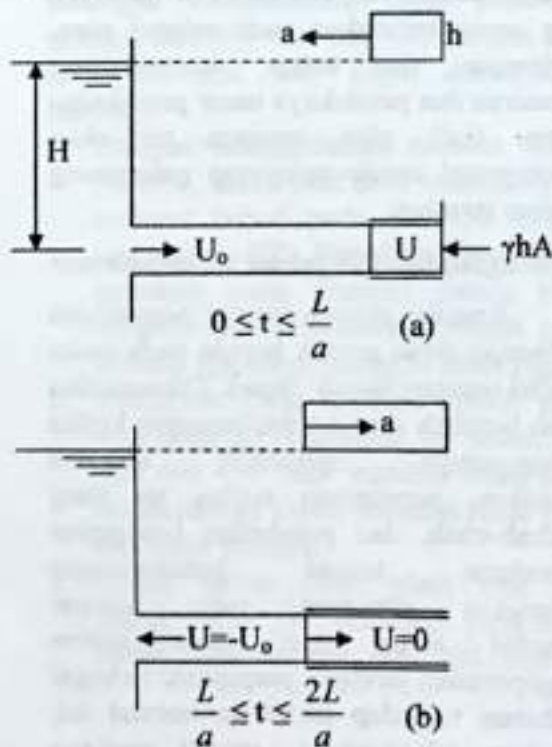
suatu gerak lambat osilasi massa air disebabkan oleh fluktuasi tekanan internal di dalam sistem. Ini dapat digambarkan sebagai gelombang tekanan "lambat" yang terjadi di dalam sistem. Baik *waterhammer* maupun *surge* dikenal sebagai tekanan transient(sesaat). Jika tidak dikendalikan, mereka keduanya memberikan dampak yang sama: kerusakan pada saluran pipa, sambungan, dan katup, menyebabkan kebocoran dan pendeknya umur pemakaian sistem. Baik pipa maupun air akan terkompresi untuk menyerap gelombang tekanan tersebut.

II. Menganalisa Penyebab *Waterhammer*

Kondisi sistem operasi penyaluran air hampir tidak pernah berada pada suatu kondisi mantap(*Steady State*). Tekanan dan aliran berubah secara terus menerus ketika pompa-pompa dijalankan maupun dimatikan, permintaan suplay air yang berubah-ubah, dan perubahan ketinggian permukaan tangki penampungan merupakan peristiwa yang hamper dijumpai setiap hari pada sistem pengoperasian jaringan perpipaan. Sebagai tambahan terhadap peristiwa normal ini, peristiwa tak terduga, seperti matinya

tenaga penggerak dan rusaknya peralatan yang digunakan, dapat mengubah secara drastic kondisi operasi suatu sistem. Perubahan lain pada laju aliran airnya, dengan mengabaikan besar tingkat perubahannya, maka air dalam jaringan perpipaan akan dipercepat atau diperlambat dari kecepatan pengaliran awalnya. Perubahan laju aliran dengan cepat di dalam sistem perpipaan memerlukan sejumlah besar daya yang kemudian menimbulkan tekanan besar, yang menyebabkan terjadinya *waterhammer*.

Ketika suatu aliran fluida berubah secara tiba-tiba, maka hal ini dapat menimbulkan puncak tekanan yang sangat besar di dalam pipa. Sebagai contoh adalah peningkatan tekanan ketika katup kontrol ditutup secara tiba-tiba. Fluida yang berada di dekat katup dihentikan seketika sementara aliran dari hulu pipa masih tetap mengalir sehingga hal ini menimbulkan gelombang kejut di ujung pipa (di katup kontrol). Gelombang kejut ini akan mulai merambat secara bolak balik mulai dari katup sampai ke unit tekan/reservoir.



Gambar 1 Urutan peristiwa untuk satu siklus penutupan katup secara tiba-tiba.

Untuk mengetahui rangkaian peristiwa yang terjadi ketika penutupan secara tiba-tiba sebuah katup pada ujung hilir aliran dapat dilihat pada gambar 1 yang dijelaskan di bawah ini.

Saat penutupan katup ($t = 0$) fluida yang terdekat dengan katup termampatkan dan berhenti, dan dinding pipa akan memuai (gb. 1a). Lapisan fluida yang termampatkan ini akan terus berlanjut untuk lapisan-lapisan berikutnya. Fluida di sebelah hulu aliran akan terus bergerak dengan kecepatan awal U_0 sampai akhirnya lapisan-lapisan termampatkan ini sampai ke sumber aliran (unit tekan / reservoir). Tekanan tinggi yang timbul sewaktu penutupan katup akan bergerak ke hulu aliran berupa gelombang kejut yang sewaktu melintasi fluida akan menyebabkan fluida berhenti, memampatkan fluida serta mamuaikan pipa. Saat gelombang kejut ini mencapai hulu pipa ($t = L/a$), seluruh fluida akan mengalami kenaikan head tekanan h , seluruh momentum telah hilang dan

seluruh energi kinetik telah dirubah menjadi energi elastik.

Kondisi ini kemudian akan menimbulkan keadaan tak seimbang pada saat gelombang tekanan tiba di unit tekan / reservoir. Ini disebabkan karena unit tekan / reservoir tidak berubah. Fluida mulai mengalir kembali (gb. 1b) dari ujung hulu. Aliran ini membuat tekanan kembali normal seperti sebelum penutupan katup, dinding pipa kembali normal dan fluida mempunyai kecepatan U_0 dalam arah mundur. Proses perubahan ini merambat ke hilir menuju katup dengan kecepatan suara a . Pada waktu $t = 2L/a$, gelombang tekanan tiba di katup, tekanan kembali normal sepanjang pipa, kecepatan U_0 sama dimana-mana dalam arah mundur.

Karena katup dalam keadaan tertutup, maka tidak tersedia fluida untuk menjaga aliran pada katup sehingga timbullah head tekanan yang rendah $-h$, yang sedemikian rupa sehingga fluida berhenti bergerak. Gelombang tekanan rendah ini kemudian bergerak kembali ke hulu (gb. 1c) dengan kecepatan a sehingga fluida berhenti bergerak, mengakibatkan fluida mengembang karena tekanan rendah, dan memungkinkan pipa menciut. Jika tekanan statik di dalam pipa tidak cukup tinggi untuk menjaga $-h$ di atas tekanan penguapan fluida, maka fluida akan menguap sebagian dan semakin bergerak mundur lebih lama.

Saat gelombang tekanan negatif tiba di hulu pipa, $t = 3L/a$ sesudah penutupan, fluida tidak bergerak tetapi berada pada head tekanan $-h$ yang lebih kecil dari kondisi sebelum penutupan katup. Hal ini menyebabkan kondisi tak seimbang pada unit tekan / reservoir dan fluida kembali bergerak di dalam pipa (gb. 1d) dengan kecepatan maju U_0 dan mengembalikan pipa dan fluida ke kondisi normal. Gelombang kejut ini bergerak ke hilir menuju katup dengan kecepatan a . Gelombang kejut mencapai katup pada $t = 4L/a$.

Proses ini akan berulang setiap $4L/a$. Waktu yang dibutuhkan suatu gelombang kejut untuk bergerak satu siklus bolak balik dari katup ke unit tekan / reservoir disebut waktu penutupan kritis

$$T_{kr} = \frac{2L}{a}$$

dimana T_{kr} : Waktu penutupan katup kritis (s)

L : Panjang pipa (m)

a : Kecepatan rambat

suara di dalam fluida (m/s)

Jika $T < T_{kr}$ maka disebut penutupan katup secara tiba-tiba dan jika $T > T_{kr}$ disebut penutupan katup secara lambat. Kerugian gesekan fluida dan elastisitas fluida serta dinding pipa yang tidak sempurna akan meredam gelombang kejut yang terjadi dengan interval waktu t_0 sehingga fluidanya akan diam / terhenti secara permanen pada level tekanan yang stabil.

Masuknya udara ataupun perubahan temperatur di dalam sistem perpipaan juga dapat menyebabkan terjadinya tekanan berlebih di dalam jaringan perpipaan. Udara yang terperangkap di dalam jaringan pipa akan terkompresi dan akan menimbulkan tekanan ekstra pada air. Perubahan temperatur secara actual dapat menyebabkan air berekspansi atau berkontraksi, juga mempengaruhi tekanan di dalam sistem. Tekanan maksimum yang terjadi di dalam suatu sistem jaringan pipa sering menghasilkan pemisahan kolom uap air, yang disebabkan oleh pembentukan uap air ketika tekanan turun sangat rendah sehingga air mencapai tekanan jenuh dan mendidih atau menguap. Kerusakan akibat tekanan dapat terjadi ketika kondisi ini terjadi.

Penyebab *waterhammer* bervariasi. Namun secara garis besar ada empat peristiwa yang menyebabkan perubahan tekanan yang besar:

1. Start awal pompa dapat menghilangkan dengan cepat ruang kosong pada arah muara (seksi tekan) dari suatu sistem

- pompa. Ini menghasilkan tekanan tinggi.
2. Gangguan pada pompa dapat menimbulkan perubahan aliran dengan cepat, yang menyebabkan kenaikan tekanan pada sisi pengisapan dan turunnya tekanan pada sisi tekan pompa. Turunnya tekanan adalah merupakan masalah utama. Tekanan pada sisi tekan pompa dapat mencapai tekanan jenuh/penguapan air, menghasilkan pemisahan koloid uap air.
 3. Pembukaan dan penutupan katup adalah persoalan dasar untuk menjaga sistem pengoperasian jaringan perpipaan tetap bekerja baik. Penutupan katup pada ujung akhir suatu saluran menimbulkan suatu gelombang tekanan yang kemudian bergerak ke arah *reservoir*/sumber tekanan. Penutupan katup dengan waktu yang lebih kecil dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan gelombang tekanan untuk bergerak ke *reservoir*/sumber tekanan dan kembali ke ujung akhir saluran disebut "penutup katup mendadak". Penutupan katup mendadak akan mengubah kecepatan seketika dan mengakibatkan terjadinya fluktuasi tekanan. Fluktuasi tekanan yang ditimbulkan oleh suatu pembukaan katup mendadak pada umumnya tidak terlalu berlebihan.
 4. Pemakaian peralatan pengendali fluktuasi tekanan bisa jadi malah lebih merugikan dibandingkan dengan manfaatnya. Misalnya pemilihan ukuran yang berlebih untuk katup *relief*-tekanan (*surge relief-valve*) atau ketidaksesuaian pemilihan katup untuk udara vakum (*vacuum breaker-air relief valve*). Contoh yang lain adalah jika menggunakan alat pengendali *waterhammer* pada suatu sistem yang mungkin tidak mengalami masalah *waterhammer*.

III. Solusi Praktis untuk Mencegah Terjadinya *Waterhammer*

Gelombang tekanan harus ditambahkan pada tekanan operasi di dalam merancang/mendisain sistem perpipaan. Rekomendasi mengenai gelombang tekanan yang dibutuhkan dalam mendisain sistem perpipaan diberikan pada manual standar dari *American Water Works Association (AWWA)*, dan bervariasi tergantung pada jenis pipa yang digunakan. Berikut adalah beberapa peralatan yang dapat digunakan untuk mengurangi efek *waterhammer*:

a. Katup

Waterhammer sering merusakkan pompa sentrifugal ketika daya listrik mati. Pada situasi ini, cara yang terbaik untuk mencegah *waterhammer* adalah dengan menggunakan katup yang dikontrol secara otomatis untuk menutup pelan-pelan. Katup ini bekerja tanpa menggunakan energi baterai atau listrik, melainkan dikendalikan oleh arah aliran. Penutupan katup secara perlahan dapat mengendalikan kenaikan tekanan ketika tekanan rendah yang dihasilkan dari penutupan katup kembali dari *reservoir*/sumber tekanan.

Masuknya udara atau perubahan temperatur air dapat dikendalikan dengan menggunakan katup *relief* tekanan (*pressure relief valve*), yang akan mulai terbuka ketika terjadi kelebihan tekanan di dalam jaringan pipa dan kemudian menutup ketika tekanan jatuh/rendah. Katup *relief* biasanya digunakan di dalam stasiun pompa untuk mengendalikan gelombang tekanan dan untuk melindungi stasiun pompa. Katup ini bisa menjadi metoda yang efektif untuk mengendalikan tekanan transien. Bagaimanapun, ukurannya dan posisi pemasangannya harus ditentukan secara tepat untuk meredam terjadinya *waterhammer* tanpa menimbulkan efek samping.

Jika tekanan jatuh pada titik yang cukup tinggi, maka suatu katup relief vakum (*vacuum relief valve*) harus digunakan. Udara vakum akan dilepaskan pada katup, jika tepat dalam pemilihan dan ukuran, maka dapat memberikan keuntungan yang berarti pada perlindungan sistem perpipaan. Sebuah katup ruang hampa harus cukup besar untuk melepaskan sejumlah udara yang cukup selama terjadi penurunan tekanan sehingga tekanan di dalam saluran perpipaan tidak jatuh terlalu rendah. Bagaimanapun, alat ini tidak boleh terlalu besar yang berisi sejumlah volume udara yang besar, sebab udara ini akan dilepaskan perlahan, yang akan menurunkan waktu pemakaian sistem. Ukuran katup pelepas udara harus merupakan ukuran kritis.

b. Pompa

Permasalahan start awal pompa dapat dihindarkan dengan meningkatkan laju aliran secara perlahan untuk mengisi atau membuang ke luar ruang kosong pada jaringan pipa. Teknik ini merupakan suatu cara yang sederhana dalam mengurangi fluktuasi tekanan hidrolik untuk menjaga kecepatan aliran dalam jaringan perpipaan tetap rendah. Ini tidak hanya mengakibatkan penurunan fluktuasi tekanan, tetapi juga menyebabkan penggunaan daya yang lebih rendah sehingga kondisi operasi maksimum dan ekonomis.

c. Tangki Pengelak (*Surge Tank*)

Pada sistem jaringan perpipaan yang panjang, *surge* dapat dihindarkan dengan menggunakan suatu tangki air yang dihubungkan secara langsung pada instalasi perpipaan yang disebut "*surge tank*". Ketika terjadi *surge*, tangki akan bekerja untuk menyalurkan tekanan, dan dapat menyimpan luapan air yang berlebih, memberi alternatif pengaliran lebih baik untuk mengatasi ekspansi tekanan dan dinding pipa oleh air. *Surge tank* dapat

melayani baik fluktuasi tekanan positif maupun fluktuasi tekanan negatif. *Surge tank* ini dapat juga dirancang untuk menyediakan air untuk sistem jaringan perpipaan selama terjadi penurunan tekanan, sehingga dapat mencegah atau memperkecil terjadinya pemisahan kolom uap air. Bagaimanapun, *surge tank* merupakan alat pengendali fluktuasi tekanan yang cukup mahal.

d. Tabung Udara (*Air Chamber*)

Tabung udara (*air chamber*) dipasang pada daerah yang sering mengalami fenomena *waterhammer*, dan sering dijumpai di dekat pompa yang juga berfungsi sebagai control otomatis untuk sistem kelistrikan pompa dan bak mandi. Berbentuk botol/tabung tipis yang berisi udara, yang dipasang terbalik dengan mulut berbentuk orifice kecil yang dihubungkan pada pipa. Udaranya akan terkompresi untuk menyerap gelombang tekanan, melindungi sistem jaringan perpipaan dari kerusakan/pecah akibat *waterhammer*.

IV. Kesimpulan

Waterhammer tetap akan menjadi tantangan bagi ahli teknik, operator, dan para manajer sistem jaringan perpipaan dalam hubungannya dengan sistem jaringan perpipaan yang tidak bisa digambarkan secara tepat dalam kaitan dengan panjang dan ukuran dari sistem distribusi air dengan profil gelombang tekanan yang terjadi atau ketidak tepatan pemilihan komponen sistem jaringan perpipaan seperti katup atau pompa. Diperlukan adanya suatu pendekatan yang lebih praktis melalui riset yang berkelanjutan untuk memberikan uraian yang lebih baik menyangkut sifat fisik *waterhammer* dan untuk pemanfaatan metode komputasi untuk menyelesaikan persoalan mendasar tentang *waterhammer*.

Referensi

- Blevins, R. D., 1984, "Applied Fluid Dynamics Handbook", Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Brater, E. F. dan Williams, H. K., 1976, "Handbook of Hydraulics", sixth edition, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Foundation Coalition, 1997, "A Unified Framework for Engineering Science: Principles and Sample Curricula",
http://www.foundationcoalition.org/home/sophomore/SEC_problems1.html, diakses 15 - 7 - 2003
- Franzini, J. B. dan Finnemore, J. E., 1997, "Fluid Mechanics with Engineering Applications", ninth edition, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Haikio Sami, dkk. 2002, "Modeling of Water Hammer Phenomenon-Based Pressure Intensifier", IHA, Tampere University of Technology, Finland.
- Imnoeng, 2003, "Water Hammer Calculation Hydraulic Transient Analysis",
<http://www.imnoeng.com/WaterHammer/WaterHammer.htm>,
(diakses 23/7/2003).
- Lahlou, Z. M., 2003, "Tech Brief Water Hammer", On Tap Magazine-Tech Brief Winter,
http://www.foundationcoalition.org/home/sophomore/SEC_problems1.html, diakses 15 - 7 - 2003
- Parmakian John, 1986, "Pump Handbook", Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Streeter, V. L., 1995, "Mekanika Fluida", Erlangga, Jakarta.