

ANALISIS TRANSIEN POMPA PENGISI KETEL

Priyono Sutikno
Lembaga Penelitian - ITB

ABSTRAK

ANALISIS TRANSIEN POMPA PENGISI KETEL. *Turbine Load Rejection* merupakan pembuangan beban turbin dan salah satu penyebab adanya *pen-by-pass-an* pada PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) yang dilakukan dengan cara mengalihkan uap panas lanjut yang seharusnya diekspansi dalam turbin uap, tetapi dialihkan langsung ke dalam kondensor. Sesaat *Turbine Load Rejection* dilakukan, maka keadaan transien segera terjadi. Salah satu bagian yang paling kritis pada kondisi transien ini adalah pompa pengisi ketel (Boiler Feed Pump=BFP). Bahaya kavitasi bisa terjadi bila ΔH_{max} (Penurunan $NPSH_{available}$) melampaui batas kritis yang diizinkan. Selama ini, pendekatan yang digunakan untuk menganalisis keadaan ini adalah dengan mengasumsikan bahwa temperatur dari kondensat yang memasuki deaerator adalah konstan. Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan yang lebih realistis, yaitu temperatur kondensat yang memasuki deaerator berubah sebagai fungsi waktu. Penurunan tekanan dan temperatur di dalam deaerator, waktu sehingga kondensat yang ada di dalam *hot well condensor* memasuki deaerator serta waktu keadaan transien telah dapat diramalkan. Penurunan entalpi dan tekanan di bagian isap dari BFP menjadi masalah utama yang dibahas dalam penelitian ini. Fungsi matematik disertakan untuk lebih menjelaskan permasalahan. Selain kejadian di atas kerusakan dapat terjadi pada *tray-stack* di deaerator dan kerusakan struktur di dalam bagian deaerator PLTU terjadi pada saat perubahan beban (*transient load operation*) dari turbin uap utama. Kerusakan ini terjadi oleh karena beberapa sebab, antara lain karena perkiraan perbedaan tekanan sepanjang *tray-stack* yang terlalu kecil. Dan kesalahan pemilihan ukuran saluran penyeimbang tekanan yang menghubungkan antara tangki penyimpanan air dan bagian deaerator. Kedua hal di atas merupakan penyebab utama dari kegagalan deaerator dan dapat mengakibatkan kegagalan sistem. Dengan demikian, kriteria desain dari penyeimbang tekanan dan *tray stack* serta peralatan disekitarnya perlu diperhatikan pada operasi pembuangan beban cepat (*rapid load rejection*) dari turbin. Di bawah pengaruh operasi pembuangan beban cepat tersebut, tekanan turun sehingga dapat menyebabkan *flashing* (penguapan cepat akibat turunnya tekanan) dari air saturasi, dan dapat menyebabkan air yang tersimpan di dalam tangki (*storage tank*) terbawa ke atas melalui penyeimbang tekanan dengan kemungkinan terjadi banjir pada bagian deaerator. Hal ini dapat terjadi jika desain penyeimbang tekanan tidak memperhatikan operasi transien pada saat merancang/menentukan ukuran penyeimbang tekanan tersebut.

ABSTRAK

ANALYSIS ON TRANSIENT PHENOMENA OF BOILER FEED PUMP. *Turbine Load Rejection* is a process of which the water steam released its energy abnormally, such as the water steam flows directly to a condenser without expanding it first in a steam turbine. This could lead to transient phenomena that is critical to a boiler feed pump for it can cause cavitation to occur when ΔH_{max} exceeds the permissible critical limit. Approximation commonly used to analyze such condition is that to assume that the temperature of condensate entering a deaerator is constant. In this experiment, a more realistic approximation is used in which temperature of condensate varies with time. Pressure drop and temperature of deaerator, time needed by condensate in hot well deaerator to reach the deaerator as well as transient time are calculated. The change of enthalpy and pressure drop in the suction near of boiler feed pump are analyzed in detail. In spite of that, transient load operation of main steam turbine can damage the tray stack and other mechanical structure of the deaerator. Those are due to that the estimation value of pressure drop along the tray stack is too small and that of misjudgment in determining the conversion of piping connecting water storage tank and deaerator. Those could lead to a failure in deaerator as well as system failure. For that, rapid load rejection phenomena should be taken into consideration in designing the pressure equalizer and tray stack. It is because of that the pressure during transient, could drop rapidly that lead to a flashing of saturated water that causes the water in storage tank

flows upward to the pressure equalizer. The latter could lead to an overflow of water in the deaerator.

PENDAHULUAN

Pada keadaan transien akibat pembuangan beban cepat atau operasi transien yang berat, biasanya, perbedaan tekanan yang terjadi pada *tray stack* dapat berlebihan hingga 10 kali sampai 20 kali lebih besar dari perbedaan tekanan yang terjadi saat turbin bekerja pada beban maksimum. Jika *tray stack* dirancang hanya sampai dapat menanggulangi beban maksimum yang stabil, maka hasil rancangan tersebut kemungkinan tidak dapat menanggulangi beban dinamik yang berat [1, 2, 3].

Pada studi selanjutnya akan dibuat model matematik dan analisis matematik perilaku transien dari deaerator, akibat pembuangan beban turbin secara tiba-tiba. Analisis penurunan tekanan di penyeimbang tekanan dan pada *tray-stack* serta perubahan sifat fisik uap dan air pada deaerator serta masalah *flashing* dapat dianalisis dan dimodelkan, sehingga dapat digunakan sebagai simulasi. Selanjutnya hasilnya dapat dianalisis dan digunakan untuk membuat kriteria penentuan ukuran penyeimbang tekanan dan *tray stack*.

Masalah pada pompa pengisi ketel :

Pada pusat pembangkit listrik tenaga uap, daya poros dihasilkan dengan cara memberikan energi panas ke air (*feedwater*) pada tekanan tinggi dan mengubahnya menjadi uap panas lanjut. Proses tersebut terjadi di dalam ketel. Energi tersebut kemudian diubah menjadi energi mekanik pada turbin, yang selanjutnya energi mekanik tersebut digunakan untuk diembunkan kembali di dalam kondensor, dan kondensatnya dipompakan kembali ke dalam ketel.

Siklus dasar pembangkit uap di atas yang biasanya disebut siklus Rankine sederhana tertutup, dapat diperbaiki performansinya dengan cara mengekstraksikan sebagian uap dari turbin pada tingkat tekanan tertentu untuk memanaskan kondensat di regenerator (*feedwater heater*=FWH). Selain untuk memperbaiki performansi, pemanasan kondensat di FWH dapat mencegah terjadinya regangan termal di ketel akibat adanya perbedaan temperatur yang besar antara kondensat yang baru masuk dan uap yang dihasilkan.

Terdapat dua jenis FWH yang sering digunakan yaitu FWH jenis tertutup dan FWH jenis terbuka. Pada FWH jenis tertutup aliran kon-

densat dan aliran uap terpisahkan, dan panas dari uap harus menembus dinding pemisah sebelum sampai ke kondensat. Sedangkan pada FWH jenis terbuka, perpindahan panas terjadi sebagai akibat pencampuran secara langsung antara kondensat dan uap. Jenis FWH yang terakhir ini biasa disebut dengan deaerator. Untuk lebih meningkatkan efisiensi suatu sistem pembangkit tenaga uap, biasanya dipasang beberapa FWH.

Dalam suatu sistem pembangkit tenaga uap, terdapat dua pompa yang sangat penting peranannya, yaitu pompa kondensat dan pompa pengisi ketel (*Boiler Feed Pump*=BFP).

Bila turbin kehilangan seluruh bebannya secara tiba-tiba, sistem pengaturan aliran uap akan menghentikan aliran uap ke turbin, dan mengalihkannya langsung ke kondensor. Sebagai akibatnya terjadi penurunan tekanan di semua tingkat dalam turbin, termasuk tingkat di mana uap di ekstraksi ke deaerator. Katub katub searah (*check valves*), yang dipasang pada sisi uap sebelum pemanas akan menutup. Karena kondensat panas terus dipompakan keluar dari deaerator dan kondensat dingin terus dipompakan masuk ke dalam pemanas-pemanas, maka akan terjadi kondisi transien di mana tekanan dan temperatur dalam deaerator akan turun terhadap waktu. Sementara itu tekanan dan temperatur air pada pipa isap masih tinggi.

Kondisi ini akan menyebabkan penurunan $NPSH_{available}$ dan bahaya kavitasi dalam pompa dapat terjadi.

Oleh karena itu, pada PLTU yang menggunakan pompa pengisi ketel (BFP) dengan bagian isap yang dihubungkan langsung dengan deaerator, perlu perhitungan dan penetapan $NPSH$ yang tidak hanya memenuhi pada kondisi operasi seimbang tetapi juga harus dapat memenuhi pada kondisi operasi transien pada pelepasan beban penuh.

Program komputer yang dibahas dalam laporan ini adalah program perhitungan, berdasarkan model-model matematik, untuk mengetahui penurunan tekanan, entalpi dalam deaerator dan penurunan $NPSH_{available}$ terhadap waktu selama kondisi operasi transien. Berdasarkan pada hasil perhitungan, dapat ditentukan spesifikasi teknik dari pompa pengisi ketel yang diperlukan.

Cara pemecahan permasalahan yang dilakukan meliputi :

1. Pembuatan model-model matematik mengenai perubahan temperatur, tekanan dalam deaerator dan $NPSH_{available}$ selama kondisi operasi transien.
2. Pembuatan program komputer untuk mempercepat perhitungan dengan menggunakan persamaan-persamaan matematik yang dirumuskan sebelumnya.
3. Pembuatan simulasi serta kriteria desain.

DASAR TEORI

Pompa Pengisi Air boiler

Pada pembangkit tenaga yang memiliki kapasitas yang cukup besar, biasanya digunakan 7-8 FWH (feed water heater), dengan salah satunya berupa deaerator. Pompa pengisi ketel (BFP) ini dihubungkan dengan bagian buang dari deaerator tangki penyimpan. Karena air yang ada di dalam deaerator ada pada kondisi cair jenuhnya, maka biasanya pompa ini diletakkan pada jarak yang cukup jauh (biasanya sekitar 40 kaki atau lebih) di bawah deaerator, untuk menghindari terjadinya penguapan dari air yang turun dari deaerator di bagian isap dari pompa. Selain itu, pompa tersebut juga harus mampu memompa air tersebut melewati beberapa FWH hingga sampai ke bagian drum ketel. Karenanya harus diperhitungkan penurunan tekanan yang terjadi sepanjang pipa antara bagian buang pompa hingga masuk ke dalam ketel. Biasanya tekanan pada bagian buang pompa ini 10-25% lebih tinggi dari tekanan di dalam drum ketel.

Selain itu karena letaknya yang tepat di bawah deaerator, pompa ini memiliki head hisap positif. Yang berarti, perubahan tekanan yang terjadi di deaerator harus diperhatikan supaya pompa ini tetap memiliki $NPSH_{required}$ untuk menghindari terjadinya kavitasi.

Kavitasi.

Kavitasi adalah gejala menguapnya zat cair yang sedang mengalir, karena tekanannya berkurang hingga di bawah tekanan uap jenuhnya. Apabila zat cair mendidih, maka akan timbul gelembung-gelembung uap zat cair. Hal ini dapat terjadi pada zat cair yang sedang mengalir di dalam pompa maupun di dalam pipa. Tempat-tempat yang bertekanan rendah dan/atau yang berkecepatan tinggi di dalam aliran, sangat rawan terhadap terjadinya kavitasi. Pada pompa, bagian yang mudah mengalami kavi-

tasi adalah pada sisi isapnya. Kavitasi ini akan timbul, bila tekanan isap terlalu rendah.

Jika pompa mengalami kavitasi, maka akan timbul suara berisik dan getaran. Selain itu unjuk kerja pompa akan menurun secara tiba-tiba, sehingga pompa tidak dapat bekerja dengan baik. Jika pompa dijalankan dalam keadaan kavitasi secara terus-menerus dalam jangka waktu lama, maka permukaan dinding saluran di sekitar aliran yang mengalami kavitasi akan mengalami kerusakan. Permukaan dinding akan termakan sehingga menjadi berlubang-lubang atau bopeng. Peristiwa ini disebut erosi kavitasi, sebagai akibat dari tumbukan gelembung-gelembung yang pecah pada dinding secara terus-menerus.

NPSH (Net Positive Suction Head)

Seperti diuraikan di atas, kavitasi akan terjadi jika tekanan statis suatu aliran zat cair turun sampai di bawah tekanan uap jenuhnya. Untuk menghindari kavitasi, harus diusahakan agar tidak ada satu bagianpun dari aliran di dalam pompa mempunyai tekanan statis lebih rendah dari tekanan uap jenuh cairan pada temperatur yang bersangkutan.

Untuk itu, maka didefinisikan suatu parameter yang disebut NPSH, yang dipakai sebagai ukuran keamanan pompa terhadap kavitasi. Adapun NPSH sendiri ada dua macam, yaitu $NPSH_{available}$ dan $NPSH_{required}$.

Net Positive Suction Head Available :

$NPSH_{available}$ adalah head yang dimiliki oleh zat cair pada sisi isap pompa (ekivalen dengan tekanan mutlak pada sisi isap pompa), dikurangi dengan tekanan uap jenuh zat cair di tempat tersebut. Dalam kasus pompa yang mengisap zat cair dari tempat terbuka (dengan tekanan atmosfer pada permukaan zat cair), maka besarnya $NPSH_{available}$ dapat ditulis sebagai berikut :

$$NPSH_{available} = \frac{P_a - P_v}{\gamma} + H_{st} - H_f$$

P_a = Tekanan atmosfer [psia]

P_v = Tekanan uap jenuh di sisi isap pompa [psia]

H_{st} = Head statis berharga negatif [ft]

H_f = Head loss [ft]

Pada kasus pompa pengisi ketel (BFP), zat cair diisap dari deaerator (tangki tertutup), dan zat cair di dalam deaerator diidealisasikan berada dalam kondisi cair jenuh, sehingga $P_a = P_v$. Selain itu, karena reservoir zat cairnya terletak di atas pompa, maka H_{st} berharga posi-

tif, sehingga $NPSH_{available}$ dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$NPSH_{available} = H_{el} - H_f$$

Net Positive Suction Head Required :

Supaya tidak terjadi penguapan zat cair, maka tekanan pada bagian masuk pompa, dikurangi penurunan tekanan di dalam pompa (karena kerugian head di bagian isap dan kenaikan kecepatan aliran karena luas penampang yang menyempit, dsb), harus lebih tinggi dari tekanan uap zat cair. Head tekanan yang besarnya sama dengan penurunan tekanan ini disebut $NPSH_{required}$. Besarnya $NPSH_{required}$ ini, untuk masing-masing pompa besarnya berbeda.

Keadaan pelepasan beban penuh pada turbin

Pada prinsipnya, instalasi turbin uap, memanfaatkan putaran poros turbin, yang dihubungkan dengan generator (energi mekanik), untuk membangkitkan energi listrik. Energi listrik ini kemudian didistribusikan kepada konsumen. Karena alat-alat yang memanfaatkan energi listrik ini harus dalam frekuensi yang relatif konstan (50 Hz), maka putaran turbin pun juga harus diusahakan konstan. Untuk memenuhi hal ini digunakanlah *governor*, yang mengatur besar kecilnya laju alir dari uap yang memasuki turbin. Namun bisa saja terjadi suatu keadaan dimana permintaan beban menurun drastis, atau permintaan beban naik secara drastis, sehingga *governor* tidak mampu lagi mengatasi hal itu, padahal putaran turbin harus tetap konstan. Pada kondisi ini, maka uap yang seharusnya memasuki turbin, di *by-pass*, dan dibuang langsung ke dalam kondensor. Pada kondisi ini, turbin harus tetap berputar, dan karena tidak ada lagi uap yang memasuki turbin, maka turbin diputar dengan menggunakan daya dari luar (bukan karena energi uap yang menggerakkan poros turbin).

Akibat pem-*by-pass*-an tersebut terjadi penurunan tekanan di dalam turbin dan juga di semua pipa ekstraksi. Karena terjadi penurunan tekanan tersebut, maka katup searah (check valves) yang dipasang pada sisi uap sebelum pemanas akan menutup. Hal ini adalah upaya untuk menjaga supaya pengisi air yang ada di pemanas-pemanas (fwh) tidak masuk ke dalam turbin (aliran balik), karena pada kondisi ini tekanan di pemanas-pemanas (FWH) yang mengakibatkan penurunan tekanan dan temperatur dipemanas-pemanas tersebut. Penurunan tekanan tersebut juga terjadi di dalam

deacerator. Hal ini sangat berbahaya, karena bisa mengakibatkan terjadinya kavitasi di dalam pompa pengisi ketel yang terletak langsung di bawah deacerator.

Turbin By-pass

Pem-*by-pass*-an turbin uap memerlukan pengaturan penyalaan (start-up) yang kompleks dan pembiayaan yang besar. Namun dengan adanya *by-pass* ini memungkinkan pengoperasian dari generator uap yang bisa beragam bebannya. Adapun keuntungan dari *by-pass* adalah :

- Pengoperasian pembangkit tenaga lebih mudah dan fleksibel.
- Kemampuan untuk menjaga keluaran dari generator selama penyalaan tanpa akibat-akibat yang jelek karena pendinginan turbin.
- Kemampuan untuk menyesuaikan temperatur dari material turbin pada saat pemanasan awal (hot start-up) .

Adapun kerugian dari turbin *by-pass* adalah :

- Peningkatan ongkos keseluruhan dari pembangkit tenaga.
- Kerumitan dari sistem pengaturan.
- Kemungkinan terjadinya kerusakan pada turbin dan kondensor karena perubahan tekanan dan temperatur akibat adanya pem-*by-pass*-an.
- Peningkatan pada kecepatan pembangkitan panas karena adanya kenaikan kerugian gesek di kondensor (karena peningkatan aliran) selama operasi *by-pass*.

PENURUNAN FUNGSI MATEMATIKA

Dalam perhitungan terhadap penurunan $NPSH_{available}$ ini, beberapa asumsi harus ditetapkan, antara lain :

1. Selama kondisi operasi transien, kondisi laju aliran diasumsikan dalam keadaan konstan, sehingga laju aliran kondensat yang memasuki deacerator sama dengan laju aliran kondensat yang keluar dari deacerator.
2. Tidak ada aliran kaskade dari pemanas tekanan tinggi. Juga tidak terdapat kebocoran di dalam pompa pengisi air dan aliran resirkulasi ke dalam deacerator.
3. Temperatur dan tekanan air di dalam deacerator tangki penyimpanan dalam kondisi cair jenuh.
4. Pengaruh dari kalor yang tersimpan di dalam cangkang (shell) deacerator, cangkang pemanas air pengisi ketel, dan pipa diabaikan.

5. Kondensat yang tersimpan di dalam deaerator tangki penyimpanan diasumsikan sebagai fluida inkompresibel, sehingga perubahan volume karena tekanan sangat kecil (tidak ada).
6. Pengaruh dari volume uap air di atas air yang tersimpan di dalam deaerator tangki penyimpanan diabaikan.

Perhitungan penurunan entalpi di deaerator dan di pompa.

Jika ada sejumlah massa x kondensat dengan entalpi sebesar h memasuki deaerator, maka akan terjadi perubahan entalpi di dalam deaerator, sebesar :

$$\frac{dh}{dx} = - \frac{h_d - h_o}{M} \quad (1)$$

Selanjutnya, besarnya penurunan entalpi ini dapat dibagi dalam dua zone, yaitu :

1. Jumlah kondensat yang masuk deaerator (x), lebih kecil dari jumlah kondensat yang ada di pemanas tekanan rendah dan pipa sepanjang kondensator hingga deaerator, ($x < M_{\omega}$).
2. Jumlah kondensat yang masuk deaerator (x), lebih besar dari jumlah kondensat yang ada di pemanas tekanan rendah dan pipa sepanjang kondensator hingga deaerator, ($x > M_{\omega}$).

1. $x < M_{\omega}$

Pada kondisi ini besarnya h_o menurun sejalan dengan banyaknya kondensat yang memasuki deaerator. Maka besarnya h_o dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$h_o = h_4 - \frac{h_4 - h_5}{M_{\omega}} x$$

jika didefinisikan :

$$a = \frac{h_4 - h_5}{M_{\omega}}$$

maka h_o dapat dinyatakan dalam persamaan

$$h_o = h_4 - a x \quad (2)$$

Dengan menerapkan kondisi batas, yaitu : Pada awal keadaan transien ($x=0$), $h_d=h_4$, dan mengeliminasi persamaan (1), dan (2), maka akan didapat besarnya entalpi di deaerator setelah sejumlah massa x kondensat memasuki deaerator (h_d), yaitu :

$$h_d = a (M - x) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{x}{M}} \quad (3)$$

dan entalpi di bagian isap dari pompa (h_0) :

$$h_0 = a (M - x + M_{\omega}) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{x - M_{\omega}}{M}} \quad (4)$$

Sedangkan entalpi dari deaerator pada saat kondensat yang ada di dalam hot well condensor tepat memasuki deaerator ($x=M_{\omega}$), adalah :

$$h_3 = a (M - M_{\omega}) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{M_{\omega}}{M}} \quad (5)$$

2. $x > M_{\omega}$

Pada kondisi ini entalpi dari kondensat yang memasuki deaerator sama dengan entalpi dari kondensat yang ada di hot well condensor.

Maka diperoleh kondisi batas :

- Pada saat $x=M_{\omega}$, maka $h_d=h_3$, maka dari persamaan (1) dapat diperoleh entalpi dari air jenuh di dalam deaerator (h_d) :

$$h_d = h_5 +$$

$$\left[aM \left(e^{\frac{M_{\omega}}{M}} - 1 \right) + (h_1 - h_4) \right] e^{-\frac{x}{M}} \quad (6)$$

Dari persamaan (3), (4), dan (6), terlihat bahwa penurunan entalpi di dalam deaerator, dan bagian isap pompa, merupakan fungsi dari banyaknya jumlah kondensat yang memasuki deaerator. Adapun banyaknya total kondensat yang memasuki deaerator selama keadaan transien dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$x_2 = M \log_e \left[\frac{aM \left(e^{\frac{M_{\omega}}{M}} - 1 \right) + (h_1 - h_4)}{h_2 - h_5} \right] \quad (7)$$

Analisis Penurunan NPSH_{available}

Penurunan NPSH_{available} dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta H = 144 (P_s - P_d) \left[\frac{v_s - v_d}{2} \right] \quad (8)$$

Besarnya ΔH ini berubah-ubah selama keadaan transien, ΔH berharga nol pada awal keadaan transien, dan kemudian membesar mencapai ΔH_{\max} kemudian berangsur-angsur me-

nurun hingga mencapai harga nol pada akhir keadaan transien.

Seperti diketahui, untuk menghindari terjadinya kavitasi, maka :

$$NPSH_{available} = NPSH_{required} \quad (a)$$

dan pada keadaan transien,

$$NPSH_{available} = H_{st} - H_f + \Delta H \quad (b)$$

maka berdasarkan persamaan (a) dan (b), supaya tidak terjadi kavitasi harus dipenuhi :

$$H_{st} > H_{required} + H_f + \Delta H_{max}$$

Seperti terlihat dari persamaan (8) ΔH merupakan fungsi dari beda ($p_s - p_d$), padahal yang didapat dari persamaan (3), (4), dan (6), adalah h_d , dan h_s . Maka untuk dapat menggunakan persamaan (8), h_d , dan h_s harus diubah dulu menjadi p_d , dan p_s dengan menggunakan pertolongan tabel uap.

Namun karena hubungan antara entalpi (h) dan tekanan (p) tidak linier, maka ada kemungkinan terjadinya kesalahan, catatan : karena adanya ketidaklinieran ini, maka J. Karassik menawarkan perhitungan ΔH dengan rumus :

$$\Delta H_{max} = \frac{S \left(h_1 - \frac{h_4 - h_5}{2} \right)}{K_h}$$

$$K_h = dh/dp \text{ [BTU/lb/ft]}, \text{ dan } s = M_w/M$$

Selanjutnya, banyaknya jumlah kondensat yang memasuki deaerator pada saat terjadinya h_{max} , dapat dinyatakan dalam hubungan sbb :

$$x_{max} = M \log_e$$

$$\left[e^{\frac{M_w}{M}} + \frac{(aM - h_1 + h_4) (e^{\frac{M_w}{M}} - 1)}{aM} \right] \quad (9)$$

Kemudian, untuk menghitung lamanya waktu yang diperlukan dari awal keadaan transien, hingga akhir keadaan transien dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$t_2 = \frac{M}{W_c} \log_e \left[\frac{aM (e^{\frac{M_w}{M}} - 1) + (h_1 - h_4)}{h_2 - h_5} \right] \quad (10)$$

Jadi, dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas, kita dapat mengetahui :

- penurunan tekanan di dalam deaerator, dan di bagian isap pompa selama keadaan transien.
- Waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya penurunan $NPSH_{availablemax}$ dan banyaknya kondensat yang telah memasuki deaerator, pada saat kondisi ini terjadi.
- Waktu yang dibutuhkan, hingga kondensat yang ada di dalam *hot well condensor* memasuki deaerator, dan waktu yang dibutuhkan, dari awal hingga akhir keadaan transien.
- Banyaknya kondensat yang memasuki deaerator, dari awal keadaan transien, hingga akhir keadaan transien.
- Kemudian hasil-hasil yang didapat tadi di plot dalam grafik.

Untuk dapat mengetahui hal-hal di atas, maka data-data yang harus diketahui adalah :

- $p_1, p_2, h_1, h_2, h_4, h_5, M, M_w, M_s, H_{st}, W_w, W_c$
Kemudian dari data-data di atas, urutan pengerjaannya adalah sebagai berikut :

1. Mencari banyaknya kondensat selama keadaan transien, dengan persamaan :

$$x_{max} = M \log_e$$

$$\left[e^{\frac{M_w}{M}} + \frac{(aM - h_1 + h_4) (e^{\frac{M_w}{M}} - 1)}{aM} \right]$$

2. Dari x_{max} yang diperoleh, diperiksa, apakah x_{max} tersebut lebih besar atau lebih kecil dari M_w . Apabila $x_{max} < M_w$, maka untuk mencari h_d dibutuhkan :

$$h_d = a (M - x) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{x}{M}}$$

sebaliknya apabila $x_{max} > M_w$, maka digunakan persamaan :

$$h_d = h_5 + \left[aM (e^{\frac{M_w}{M}} - 1) + (h_1 - h_4) e^{-\frac{x}{M}} \right]$$

Adapun untuk mencari entalpi di bagian isap pompa (h_s), digunakan persamaan :

$$h_s = a (M - x + M_w) + h_4 -$$

$$(aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{x - M_w}{M}}$$

3. Dari entalpi (h_s dan h_d) yang didapat, maka p_d, p_s, v_d , dan v_s dapat dicari dengan menggunakan Tabel uap, kemudian penurunan

NPSH_{available} (ΔH), dapat dicari dengan persamaan :

$$\Delta H = 144 (p_s - p_d) \left[\frac{v_s - v_d}{2} \right]$$

4. Kemudian ΔH ini diplot ke dalam grafik sebagai fungsi dari banyaknya kondensat yang memasuki deaerator.
5. Kemudian dari grafik penurunan ΔH deaerator terhadap banyaknya kondensat yang masuk, diubah kedalam grafik ΔH terhadap waktu sejak terjadinya keadaan transien.

Penurunan tekanan Deaerator :

Dengan anggapan air kondensat yang masuk deaerator konstan W_c selama waktu transien, maka persamaan entalpi dapat dinyatakan [1, 2] :

$$t < t_w$$

$$h_f = a (M + W_c t) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{W_c}{M} t} \quad (11)$$

$$t = t_w$$

$$h_3 = a (M - M_w) + h_4 - (aM - h_1 + h_4) e^{-\frac{M_w}{M}} \quad (2)$$

$$t > t_w$$

$$h_f = h_5 + \left[aM \left(e^{\frac{M_w}{M}} - 1 \right) + (h_1 - h_4) \right] e^{-\frac{W_c}{M} t} \quad (13)$$

Waktu yang diperlukan untuk penurunan tekanan total, jika $t_2 > t_w$ atau ($h_2 < h_3$)

$$t_2 = \frac{M}{W_c} \log_e \frac{aM \left(e^{\frac{M_w}{M}} - 1 \right) + (h_1 - h_4)}{h_2 - h_5} \quad (14)$$

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penurunan fungsi matematik, kita mendapatkan bahwa

$$\Delta h_{max} = aM_s + M_w - M \log_e$$

$$\left[e^{\frac{M_w}{M}} + \left(1 - \frac{h_1 - h_4}{aM} \right) X \left(e^{\frac{M_s}{M}} - 1 \right) \right]$$

Jika kita misalkan :

$$W = \frac{M_w}{M}, S = \frac{M_s}{M}, \text{ dan } Y = \frac{h_1 - h_4}{h_4 - h_5}$$

Maka Δh_{max} dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta h_{max} = (h_1 - h_5) \frac{1}{W (1 + Y)}$$

$$X [S + W - \log_e [e^W + (1 - YW) (e^S - 1)]] \\ = (h_1 - h_5) \Phi$$

dimana

$$\Phi = \frac{1}{W (1 + Y)} [S + W -$$

$$\log_e [e^W + (1 - YW) (e^S - 1)]]$$

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa besar kecilnya dari Δh_{max} dipengaruhi oleh 4 faktor utama :

1. ($h_1 - h_5$)

Parameter ini sangat bergantung pada letak dari deaerator di dalam siklus rankie regeneratif. Karena dengan makin tingginya tekanan dari ekstraksi uap ke dalam deaerator, akan makin mempertinggi harga h_1 . Adapun h_5 ber-harga konstan. Sehingga, jika diinginkan agar penurunan Δh_{max} tidak terlalu besar, maka deaerator sebaiknya diletakkan pada tingkat ekstraksi yang lebih rendah.

2. $S = \frac{M_s}{M}$

Besarnya penurunan Δh_{max} proporsional dengan kenaikan dari harga S. Sehingga untuk menghindari penurunan Δh_{max} yang besar dapat ditempuh dengan cara memperbesar kapasitas deaerator atau memperkecil pipa isap dari pompa pengisi ketel.

3. $W = \frac{M_w}{M}$

Pengaruh dari parameter ini, ternyata tidak sebesar dari kedua parameter yang terdahulu. Dengan semakin besarnya harga M_w , maka akan memperkecil penurunan Δh_{max} . Namun pengaruhnya hanya kedalam kecepatan penurunan Δh_{max}

4. $Y = \frac{h_1 - h_4}{h_4 - h_5}$

Parameter ini juga tidak begitu mempengaruhi besarnya penurunan Δh_{max} parameter

ini menunjukkan bahwa, penurunan tekanan akan berjalan lebih cepat, jika pemanasan kondensat di sepanjang fwh lebih kecil dibandingkan dengan pemanasan di dalam deaerator, dalam kondisi operasi normal.

SARAN

Penyusunan dari fungsi matematika di atas, dengan mengasumsikan bahwa begitu terjadi keadaan transien, maka kondensat dari pemanas (fwh), yang terletak ditekan yang lebih besar tidak mengalir lagi kedalam deaerator. Hal ini tentu saja mempengaruhi ketelitian hasil penurunan fungsi matematik.

Karena itu apabila diinginkan fungsi matematik yang lebih teliti, maka hal-hal di atas harus dimasukkan dalam perhitungan.

Kemudian, penurunan dari tekanan deaerator dapat dihindari dengan cara :

1. Memasukkan sebagian dari uap ketel ke dalam deaerator begitu keadaan transien

terjadi. Hal ini dapat mengurangi penurunan tekanan di dalam deaerator, karena uap dari ketel akan memanaskan kondensat, begitu pemanasan dari uap ekstraksi tidak berlangsung lagi.

2. Menyuntikkan kondensat langsung dari *Hot Well Condensor*, ke dalam bagian isap pompa, sehingga penurunan tekanan di pompa dan di dalam deaerator tidak begitu berbeda. Hal ini dapat mengecilkan penurunan $NPSH_{available}$, sehingga menurunkan kemungkinan terjadinya kavitasi.

Kedua faktor di atas dapat, mengecilkan kemungkinan terjadinya kavitasi pada pompa (bfp), namun tentu saja memerlukan pengaturan yang cukup rumit, dan penambahan peralatan pengatur kontrolnya, yang juga berarti penambahan ongkos. Sehingga sebelum menentukan apakah sistem pengaturan perlu ditambah atau tidak, perhitungan ongkos harus dilakukan secara teliti terlebih dahulu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Liao, G. S. and Leung, P., Analisis of feedwater pump suction pressure decay under instant Turbin Load Rejection, *Journal of Engineering for Power*, TRANS. ASME, Series A. Vol 94 (April 1972).
2. Clemmer, A. B. and Lemezis, S., Selection and Design of Closed Feedwater Heaters, ASME Paper No. 65-WA/PTC-5
3. Liao, G.S., Analysis of Power Plant Deaerator Under Transient Turbine Loads, *Journal of Engineering for Power*, TRANS, ASME., Series A. (July 1874).
4. Thurston, R.S., Design of Suction Piping and Deaerator Storage Capacity to Protect Feed Pumps, *Journal of Engineering for Power*, TRANS., ASME., Series A (January 1961).
5. Karrasik, I. J., et.al., *Handbook of Pumps*, Mc. Graw Hill, New York (1976).

NOMENKLATUR

h_0 = Entalpi dari kondensat yang memasuki deaerator (Btu/lb) Entalpi ini berubah terus sepanjang kondisi transien.
 h_1 = Entalpi air jenuh di dalam deaerator pada saat awal kondisi transien (Btu/lb).
 h_2 = Entalpi air jenuh di dalam deaerator pada akhir kondisi transien (Btu/lb).
 h_3 = Entalpi air jenuh di dalam deaerator pada saat kondensat dingin mulai memasuki deaerator (Btu/lb).
 h_4 = Entalpi kondensat yang memasuki deaerator pada saat awal kondisi transien (Btu/lb).
 h_6 = Entalpi dari *Hot Well Condensor* (Btu/lb).
 h_8 = Entalpi dari air jenuh pada bagian isap pompa setelah sejumlah x lb kondensat memasuki deaerator (Btu/lb).

h_d = Entalpi dari air jenuh di dalam deaerator setelah sejumlah massa x kondensat memasuki deaerator (Btu/lb).

ΔH = Penurunan NPSH

$\Delta h = h_2 - h_d$

Δh_{max} = Δh maksimum selama kondisi transien.

M = Massa air di dalam deaerator tangki penyimpanan (lb).

M_w = Massa kondensat yang terdapat di sepanjang pemanas tekanan rendah dan di dalam pipa dari *Hot Well Condensor* hingga deaerator (lb)
M = Massa air di sepanjang pipa dari deaerator hingga bagian isap pompa (lb).

W_c = Laju aliran kondensat (lb/min).

- p_1 = Tekanan di dalam deaerator pada saat awal kondisi transien (psia).
 p_2 = Tekanan di dalam deaerator pada saat akhir kondisi transien (psia)
 p_s = Tekanan di bagian isap pompa setelah sejumlah massa x kondensat memasuki deaerator (psia)

- p_d = Tekanan di dalam deaerator setelah sejumlah massa x kondensat memasuki deaerator (psia)
 $a = (h_d - h_s) / M_w$
= gradien entalpi dari kondensat hangat (Btu/lb).

DISKUSI

Aliq:

1. Parameter apa yang bisa dipakai untuk mengetahui ketelitian hasil simulasi?
2. Apakah yang dimaksud dengan *Load Rejection* itu bila kehilangan beban?
3. Berapa prosentase kehilangan beban yang disimulasikan dan apa pengaruhnya?
4. Untuk menghindari itu (efek kehilangan beban) apa disarankan untuk menambah peralatan yang dibutuhkan?

Priyono Sutikno:

1. Pengukuran tekanan terhadap waktu dan dikonfrontir terhadap hasil simulasi:
Kelemahan/asumsi pada simulasi ini:
 - koefisien f yang dianggap konstan
 - simulasi satu dimensi
 - efek gravitasi diabaikan (efek 2-D) pada pipa.
2. *Load rejection* adalah penambahan beban generator sehingga uap tidak masuk tangki.
3. *Full Load Rejection* (100 % binding).
4. Ya, lihat saran pada makalah:
 - menyalurkan langsung dari pipa kondensat.
 - membuat *by pass* disekitar *discharge* kembali ke *suction* BFP (Boiler Feed Pump)
 - menambah uap pada deaerator agar tidak terjadi penurunan temperatur, tekanan turun.

Kurnia P.:

1. Fenomena fisik yang terjadi saat terjadi proses transien di pompa?
2. Ada beberapa alternatif pemecah yang anda usulkan. Bagaimana untung dan ruginya, serta teknis operasional dari alternatif-alternatif tersebut?

Priyono Sutikno:

1. Jika motor pompa tiba-tiba mati (tidak ada listrik) maka berjalan seperti pada gambar tetapi karena ada WR^2 maka masih ada putaran yang mengalirkan sejumlah Q tetapi H menurun.

2. Silahkan lihat di molekul setiap penempatan *device*, maka harus ada *justification* yang berdasarkan kurva-kurva H, Q .