

# PERANCANGAN DAN STUDI KARAKTERISTIK PRESSURIZER PADA UNTAI UJI NILO-1 UNTUK TEKANAN NOMINAL 6 MPa

HARI SURYANTO

*Mahasiswa Jurusan Ilmu dan Rekayasa Nuklir,  
Fakultas Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung*

ARYADI SUWONO

*Lab. Termodinamika, PAU-Ilmu Rekayasa  
Institut Teknologi Bandung*

## ABSTRAK

*Pada reaktor air bertekanan, pressurizer mempunyai peranan yang sangat penting diantaranya yaitu sebagai surge-tank untuk menampung perubahan volume dan sebagai pengenal tekanan pendingin primer pada berbagai kondisi perubahan beban reaktor yang sangat erat kaitannya dengan sistem keselamatan. Pemahaman yang mendalam dari gejala yang berlangsung pada alat ini merupakan landasan utama baik untuk perancangannya maupun prediksi karakteristiknya terutama saat berlangsung kelaian kondisi operasi dari reaktor. Untuk tujuan pemahaman tersebut dengan bertitik tolak dari persamaan kekekalan massa dan energi untuk volume atur serta persamaan tingkat keadaan dilakukan analisis untuk perancangan dan prediksi karakteristik sebuah model pressurizer yang bersesuaian dengan kondisi operasi untai uji NILO-1 pada tekanan operasi nominal 6 MPa. Melalui penerapan metode numerik untuk menyelesaikan persamaan differensial dilakukan simulasi kondisi operasi model pressurizer hasil rancangan termasuk respon waktu yang berlangsung pada saat mengalami perubahan kondisi operasi.*

## 1. PENDAHULUAN

Pada untai primer reaktor air bertekanan, pendingin dijaga pada suatu tekanan tertentu, yaitu sekitar 155 bar atau sekitar 15,5 MPa yang lebih besar dari tekanan jenuh pada suhu pendingin maksimum di dalam reaktor. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindari terjadinya pendidihan air pendingin atau untuk mempertahankan agar pendingin tetap dalam fase cairnya. Karena cairan pendingin, dalam hal ini air bersifat inkompresibel, maka apabila terjadi perubahan kecil volume, yang dapat disebabkan oleh perubahan kecil suhunya maka akan menyebabkan perubahan tekanan yang sangat besar. Perubahan tekanan ini dapat naik ataupun turun atau berosilasi tergantung dari perubahan suhunya<sup>[3]</sup>. Hal tersebut sangatlah berbahaya, bila suhunya naik maka tekanan juga akan naik yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem. Bila oleh suatu sebab, tekanannya turun akan dapat menyebabkan proses pendidihan yang apabila tak terkendalikan dapat memungkinkan terjadinya 'burnout' dari elemen-elemen bahan bakar<sup>[3,18]</sup>. Untuk alasan tersebut maka diperlukan adanya suatu 'surge tank' yang dapat menampung perubahan volume pendingin sementara tekanan dipertahankan pada batas-batas yang dapat diterima.<sup>[1]</sup> Hal ini sangat erat kaitannya dengan sistem keselamatan reaktor, dimana pada suatu reaktor nuklir keselamatan adalah merupakan hal yang sangat utama dan mutlak diperlukan.

Pressurizer adalah merupakan komponen dasar dari struktur sistem reaktor PWR. Proses-proses yang berlangsung pada pressurizer baik mekanisme maupun pengukuran - pengukuran yang dilakukan yang menyangkut dinamika proses di dalam pressurizer

tersebut adalah penting dan sangat menentukan untuk sistem keselamatan dan harga efektif operasi dari plant secara keseluruhan. Pemahaman yang mendalam dari gejala yang berlangsung pada alat ini merupakan landasan utama baik untuk perancangannya maupun prediksi karakteristiknya terutama pada saat berlangsung kelaian kondisi operasi dari reaktor.

Dalam makalah ini, dengan bertitik tolak dari persamaan kelestarian massa dan energi untuk volume atur serta persamaan tingkat keadaan dilakukan studi guna memahami gejala yang berlangsung pada suatu sistem pressurizer. Dalam studi ini : Pertama, melalui penerapan persamaan-persamaan kelestarian massa dan energi tersebut diatas dilakukan analisis untuk perancangan sebuah model pressurizer yang bersesuaian dengan kondisi operasi untai uji NILO-1, yaitu untuk tekanan operasi nominal 6 MPa. Kemudian yang kedua, melalui penerapan metoda numerik untuk menyelesaikan sistem persamaan differensial dilakukan simulasi kondisi operasi model pressurizer hasil rancangan tersebut termasuk respon waktu yang berlangsung pada saat mengalami perubahan kondisi operasi.

## 2. PERANCANGAN MODEL PRESSURIZER

Perancangan model pressurizer ini dilakukan melalui analisis kesetimbangan tekanan pada keadaan-keadaan akhir dimana dalam analisis ini hanya dipikirkan keadaan akhir dari proses transien yang terjadi pada pressurizer. Analisis ini dimaksudkan untuk menghitung ukuran pressurizer yang diperlukan untuk mencukupi kejadian-kejadian insurge maupun outsurge tertentu berdasarkan pada penyesuaian keadaan akhir tersebut

Dalam mengidealisasikan proses ini, keadaan pressurizer awal dan akhir dipikirkan sebagai keadaan jenuh pada suatu tekanan tertentu. Pada kasus ini parameter yang tidak diketahui adalah massa cairan, massa uap dan daya pemanas. Persamaan-persamaan yang digunakan adalah persamaan kontinuitas, persamaan kelestarian energi dan volume. Input adalah massa cairan penyemprot (spray) dan entalpi, massa surge dan entalpi, dan tekanan yang menyangkut energi dalam jenuh dan sifat-sifat volume spesifik.

Pemanas harus selalu seluruhnya tercelup dalam cairan, yang mana untuk suatu geometri pressurizer tertentu merupakan volume cairan minimum yang diperlukan. Insurge disesuaikan dengan memberikan volume uap awal yang cukup yang mana pada keadaan akhir, pressurizer terisi cairan. Input pemanas yang cukup diberikan untuk mengembalikan ke keadaan awal. Outsurge disesuaikan dengan pemberian volume cairan awal yang cukup, yang mana pada keadaan akhir pemanas masih tercelup oleh cairan setelah pemanas tersebut dioperasikan untuk memperoleh energi yang cukup untuk mengembalikan pada tekanan awal. Pada kenyataannya kondisi batas untuk outsurge adalah tekanan sistem pendingin primer minimum yang diijinkan.

Volume pressurizer total yang diperlukan adalah jumlah volume uap awal yang diperlukan untuk menyesuaikan kondisi insurge, yaitu  $(V_{g1})_{insurge}$  dan volume cairan awal yang diperlukan untuk mempertahankan pemanas masih tercelup oleh cairan pada suatu outsurge, yaitu  $(V_{f1})_{outsurge}$ . Volume total yang diperlukan pressurizer untuk operasi dengan level cairan yang cukup dan ruang uap yang cukup untuk menyesuaikan baik kejadian insurge maupun outsurge adalah<sup>[1]</sup> :

$$V_T = (V_{g1})_{insurge} + (V_{f1})_{outsurge} \quad (2.1)$$

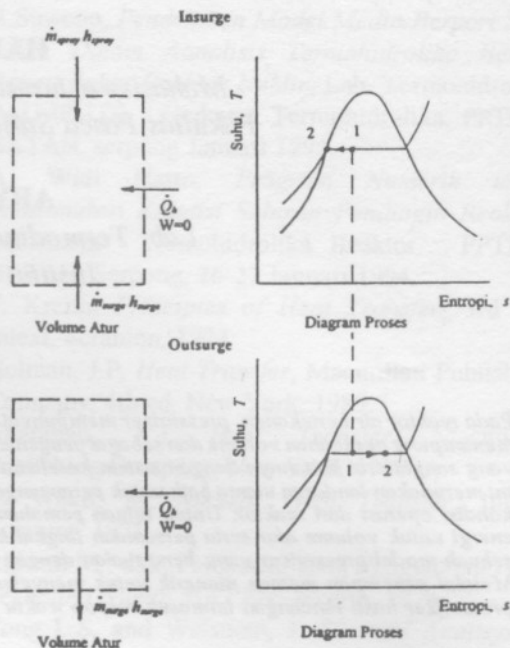
Untuk kasus seperti tersebut diatas, analisis yang sesuai adalah menganggap seluruh bagian dalam pressurizer sebagai volume atur. Volume atur dan diagram-diagram proses untuk insurge dan outsurge ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Persamaan kontinuitas, energi dan volume untuk volume atur adalah persamaan (2.2), (2.3) dan (2.4) berikut :

$$\frac{d}{dt} M_p = m_{surge} + m_{spray} \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} (M_p u) = m_{surge} h_{surge} + m_{spray} h_{spray} + \dot{Q}_h - p \frac{d}{dt} (M_p v) \quad (2.3)$$

$$\frac{d}{dt} (M_p v) = \frac{d}{dt} (m_v v_v + m_l v_l) = 0 \quad (2.4)$$



Gambar 2.1. : Representasi termodinamika dari kasus insurge dan outsurge.

Dengan mengintegrasikan persamaan-persamaan tersebut antara keadaan awal (1) dan keadaan akhir (2) dan dengan mengasumsikan laju aliran surge dan entalpi konstan terhadap waktu, kemudian memisahkan kasus insurge dan outsurge untuk mengkhususkan persamaan masing-masing kasus., yaitu untuk kasus insurge keadaan akhir dipikirkan suatu pressurizer penuh terisi cairan dan setelah air bercampur secara sempurna, air tersebut dianggap mempunyai keadaan jenuh pada tekanan awal, maka dengan mensubstitusikan hasil-hasil integrasi tersebut dengan persamaan *constraint volume*:

$$m_{f2} v_{f2} = m_{g1} v_{g1} + m_{f1} v_{f1} \quad (2.5)$$

untuk kasus insurge diperoleh :

$$(\dot{Q}_h)_{insurge} = \frac{m_{surge} (1+f) [v_g u_f - v_f u_g]}{v_g - v_f} - m_{surge} (h_{surge} + f h_{spray}) \quad (2.6)$$

dan

$$m_{g1} = \frac{m_{surge} (1+f) v_f}{v_g - v_f} \quad (2.7)$$

sedang volume uap  $(V_{g1})_{insurge}$  diperoleh dari :

$$(V_{g1})_{insurge} = m_{g1} v_g \quad (2.8)$$

dimana  $f$  dalam persamaan (2.6) dan (2.7) merupakan perbandingan aliran massa spray dan aliran massa surge. Untuk kasus outsurge, keadaan akhir harus mempunyai level cairan yang cukup sehingga pemanas masih seluruhnya tercelup oleh cairan. Dengan cara yang sama dengan kasus insurge, diperoleh :

$$(Q_h)_{outurge} = m_{surge} h_{surge} - \left(u_f - \frac{v_f}{v_g} u_g\right) \left(m_{surge} \frac{v_g}{v_g - v_f}\right) \quad (2.9)$$

dan

$$m_{f1} = m_{f2} + m_{surge} \frac{v_g}{v_g - v_f} \quad (2.10)$$

Massa cairan awal ( $m_{f1}$ ) dapat diperoleh dari:

$$(V_{f1})_{outurge} = m_{f1} v_f \quad (2.11)$$

Volume total  $V_T$  dapat diperoleh dengan menjumlahkan hasil dari persamaan (2.8) dan (2.11) yaitu :

$$V_T = (V_{g1})_{insurge} + (V_{f1})_{outurge} \quad (2.12)$$

Untuk pressurizer yang berbentuk silinder tegak dengan bagian atasnya berbentuk setengah bola, maka tinggi total pressurizer,  $L_{total}$  dapat ditentukan dari persamaan berikut :

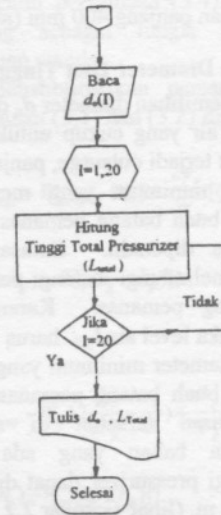
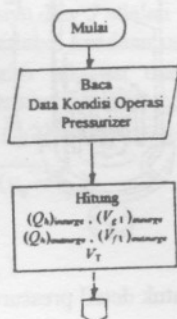
$$L_{total} = \frac{V_T - \frac{1}{24} \pi (d_o)^3}{\frac{\pi}{4} (d_o)^2} + \frac{1}{2} d_o \quad (2.13)$$

Hubungan level air untuk merendam pemanas  $L_{f2}$  dengan diameter  $d_o$  dalam kasus ini adalah :

$$L_{f2} = \frac{m_{f2} / \rho}{\pi / 4 (d_o)^2} \quad (2.14)$$

## 2.1. Perancangan Model Pressurizer Untuk NILO-1

Dengan menerapkan formulasi-formulasi yang telah didapat dalam analisis penentuan dimensi pressurizer pada bab sebelumnya, dapat ditentukan volume, energi pemanas dan level air minimum pressurizer yang diperlukan untuk untaian uji NILO-1 dengan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut :



Dengan memasukkan data kondisi operasi pressurizer untuk tekanan operasi nominal = 6MPa, temperatur jenuh ( $T_{jenuh}$ ) = 275,6 °C dan sifat-sifat jenuhnya untuk kondisi di atas, maka diperoleh  $(Q_h)_{insurge} = 1,082 \times 10^6$  Joule,  $(Q_h)_{outsurge} = 2,850 \times 10^6$  Joule, volume total pressurizer =  $37,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , dan hubungan antara tinggi total pressurizer  $L_{total}$ , level air minimum  $L_{f2}$  sebagai fungsi diameter pressurizer  $d_o$  ditunjukkan pada Gambar II.2.

### 2.1.1. Pemilihan Pemanas

Dari hasil perhitungan diatas diperoleh energi pemanas yang diperlukan untuk kasus insurge maupun outsurge adalah :

$$(Q_h)_{insurge} = 1,082 \times 10^6 \text{ Joule}$$

$$(Q_h)_{outsurge} = 2,850 \times 10^6 \text{ Joule}$$

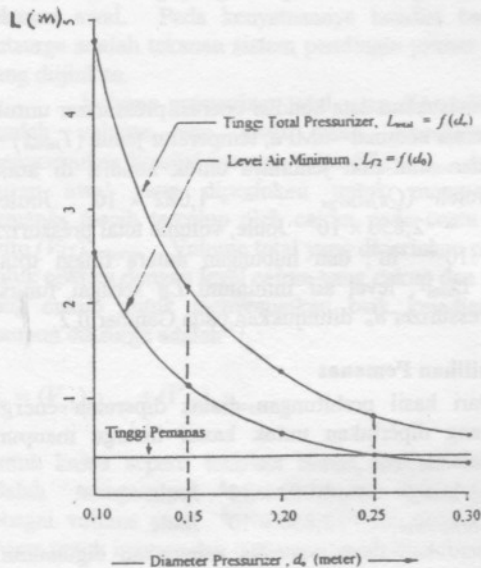
Untuk menentukan daya pemanas yang akan digunakan, perlu terlebih dahulu dipikirkan respon waktu pressurizer yang diinginkan, yaitu semakin cepat respon waktu yang diinginkan semakin besar daya pemanas yang diperlukan. Namun demikian juga masih perlu dipertimbangkan mengenai transfer panas yang terjadi dari sistem pemanas ke air dalam pressurizer.

Untuk memenuhi kebutuhan energi pemanas yang diperlukan, disini digunakan 22 buah batang pemanas yang masing-masing mempunyai daya maksimum sebesar 1500 watt, sehingga total daya pemanas maksimum yang digunakan adalah 33000 watt. Pemanas ini dapat divariasikan dayanya dari 0 watt sampai dengan daya maksimumnya. Apabila daya maksimum tersebut dapat diserap seluruhnya oleh air pressurizer, maka untuk memulihkan kejadian outsurge maksimum diperlukan waktu selama 86,36 detik.

Batang pemanas yang digunakan disini adalah tipe *immersion* yang masing-masing berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan panjang 400 mm (atau 0,4 m).

### 2.1.2. Pemilihan Diameter Dan Tinggi Pressurizer

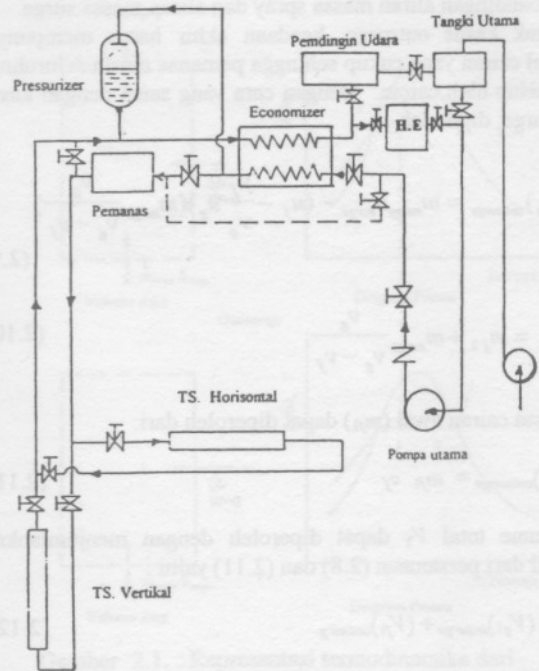
Dalam pemilihan diameter  $d_o$  dan tinggi total  $L_{total}$  pressurizer, level air yang cukup untuk merendam batang pemanas pada saat terjadi *outsurge*, panjang batang pemanas dan diameter  $d_o$  minimum yang memungkinkan untuk menempatkan 22 buah batang pemanas adalah merupakan syarat yang harus dipenuhi. Batasan level air untuk merendam atau melindungi batang pemanas harus lebih besar dari panjang pemanas. Karena panjang batang pemanas 0,4 m maka level air  $L_{f2}$  harus lebih besar dari 0,4 m. Sedangkan diameter minimum yang diperlukan untuk menempatkan 22 buah batang pemanas adalah 0,15 m. Dari batasan-batasan tersebut di atas dan dengan mempertimbangkan bahan yang ada dipasaran maka diameter dan tinggi pressurizer dapat dipilih berturut-turut 0,20 m dan 1,2234 m. (lihat Gambar 2.2. ).



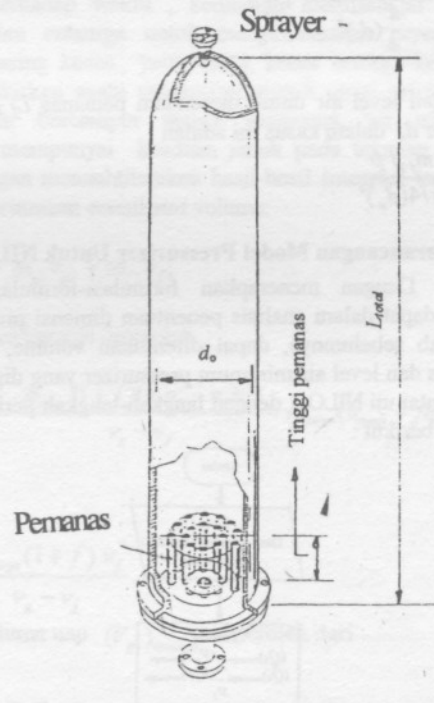
Gambar 2.2. : Grafik hubungan antara tinggi total pressurizer  $L_{total}$ , level air minimum  $L_{f2}$  dan tinggi pemanas sebagai fungsi diameter dalam  $d_o$ .

### 2.1.3. Konstruksi Model Pressurizer

Penempatan pressurizer hasil rancangan pada untai uji NILO-1 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, dimana bagian bawah dari pressurizer dihubungkan dengan *hot-leg* setelah pemanas dan *test section*, sedangkan spray diambilkan dari *cold-leg* setelah economizer. Bentuk detail dari pressurizer ini ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3. : Letak pressurizer rancangan pada untai uji NILO-1.

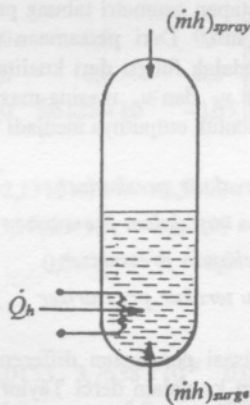


Gambar 2.4. : Bentuk detail pressurizer rancangan

### 3. MODEL MATEMATIS SISTEM PRESSURIZER

#### 3.1. Model Dinamika Pressurizer

Pada model ini, uap dan air di dalam pressurizer diasumsikan sebagai campuran homogen jenuh. Dinding pressurizer diasumsikan sebagai isolator sempurna dengan mengabaikan kapasitas panasnya. Air penyemprot (*spray*) terletak pada puncak pressurizer, dimana air penyemprot ini diambilkan dari "cold-leg", sedangkan "insurge" maupun "outsurge" melalui bagian bawah pressurizer dan terhubung dengan "hot-leg" untai primer, demikian juga pemanas terletak pada bagian bawah (lihat Gambar 3.1)<sup>[1]</sup>.



Gambar 3.1. : Laju aliran massa, entalpi dan pemanas pada sistem pressurizer.

Dengan menggunakan kesetimbangan massa dan energi, persamaan umum transien massa dan energi dapat dituliskan sebagai berikut<sup>[1, 6, 8, 10]</sup>:

$$\frac{dM_p}{dt} = W_{surge} + W_{spray} - W_{rv} \quad (3.1)$$

$$\frac{d(M_p h_p)}{dt} = \frac{V_p}{J} \frac{dP_p}{dt} + Q_h + W_{surge} h_f + W_{spray} h_{spray} - W_{rv} h_g \quad (3.2)$$

dimana:  $m_{surge}$  dan  $m_{spray}$  dalam persamaan (2.1) dan (2.2) dinyatakan dalam bentuk  $W_{surge}$  dan  $W_{spray}$ ,  $t$  adalah variabel waktu kontinyu dan  $J$  adalah vaktor konversi.

Variabel-variabel keadaan untuk model ini adalah  $P_p$  dan  $X_p$ , yaitu tekanan dan kualitas campuran. Persamaan untuk variabel-variabel tersebut diperoleh dari persamaan (3.4) dan (3.5) berikut:

$$v_p = \frac{V_p}{M_p} = v_f + X_p(v_g - v_f) \quad (3.4)$$

$$h_p = h_f + X_p(h_g - h_f) \quad (3.5)$$

dimana  $v_f$  dan  $v_g$  adalah volume spesifik air jenuh dan uap jenuh. Sifat-sifat jenuh persamaan (3.4) dan (3.5) dapat dinyatakan langsung sebagai fungsi tekanan dengan menggunakan tabel uap standar.

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.4) dan (3.5) kedalam persamaan (3.1) dan (3.2) diperoleh<sup>[8, 10]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dt} = & -\alpha \left\{ v_p \frac{\partial h_p}{\partial X_p} (W_{surge} + W_{spray} - W_{rv}) + \frac{\partial v_p}{\partial X_p} [Q_h + W_{surge} (h_f - h_p) \right. \\ & \left. + W_{surge} (h_{spray} - h_p) - W_{rv} (h_g - h_p)] \right\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_p}{dt} = & \alpha \left\{ v_p (W_{surge} + W_{spray} - W_{rv}) \left( \frac{\partial h_p}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right) + \frac{\partial v_p}{\partial P_p} [Q_h + W_{surge} (h_f - h_p) \right. \\ & \left. + W_{spray} (h_{spray} - h_p) - W_{rv} (h_g - h_p)] \right\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

dimana:

$$\alpha = \frac{v_p}{V_p \left[ \frac{\partial v_p}{\partial P_p} \frac{\partial h_p}{\partial X_p} - \frac{\partial h_p}{\partial X_p} \left( \frac{\partial h_p}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right) \right]} \quad (3.8)$$

Persamaan (3.7) dan (3.6) dapat ditulis dalam bentuk berikut:

$$X_p = b_{11} W_{surge} + b_{12} W_{spray} + b_{13} W_{rv} + b_{14} Q_h \quad (3.9)$$

$$P_p = b_{21} W_{surge} + b_{22} W_{spray} + b_{23} W_{rv} + b_{24} Q_h \quad (3.10)$$

$b_{ij}$  dalam persamaan (3.9) dan (3.10) adalah tergantung dari  $X_p$  dan  $P_p$ , sehingga kedua persamaan tersebut adalah persamaan-persamaan differensial non linier. Komponen  $b_{ij}$  berturut-turut dapat dituliskan sebagai berikut<sup>[6]</sup>

$$b_{11} = \alpha \left[ v_p \left( \frac{\partial h}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right) + \frac{\partial v_p}{\partial P_p} (h_{surge} - h_p) \right] \quad (3.11)$$

$$b_{12} = \alpha \left[ v_p \left( \frac{\partial h}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right) + \frac{\partial v_p}{\partial P_p} (h_{spray} - h_p) \right] \quad (3.12)$$

$$b_{13} = \alpha \left[ v_p \left( \frac{\partial h}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right) + \frac{\partial v_p}{\partial P_p} (h_g - h_p) \right] \quad (3.13)$$

$$b_{14} = \alpha \left[ \frac{\partial v_p}{\partial P_p} \right] \quad (3.14)$$

$$b_{21} = -\alpha \left[ v_p \frac{\partial h_p}{\partial X_p} + \frac{\partial v_p}{\partial X_p} (h_{surge} - h_p) \right] \quad (3.15)$$

$$b_{22} = -\alpha \left[ v_p \frac{\partial h_p}{\partial X_p} + \frac{\partial v_p}{\partial X_p} (h_{spray} - h_p) \right] \quad (3.16)$$

$$b_{23} = \alpha \left[ v_p \frac{\partial h_p}{\partial \chi_p} + \frac{\partial v_p}{\partial \chi_p} (h_g - h_p) \right] \quad (3.17)$$

$$b_{24} = - \alpha \left[ \frac{\partial v_p}{\partial \chi_p} \right] \quad (3.18)$$

Suatu tambahan variabel keadaan adalah suhu dari campuran air jenuh dalam pressurizer  $T_i$  (dengan asumsi tidak ada nois yang timbul), harga  $T_i$  tersebut berhubungan dengan  $T_a$ , yaitu suhu sesungguhnya dalam bentuk persamaan berikut<sup>[6, 8, 10]</sup> :

$$T_i = \frac{1}{\tau} [T_a - T_i] \quad (3.19)$$

Persamaan (3.19) di atas adalah merupakan persamaan pendekatan orde pertama dan harga  $\tau$ , yaitu tetapan waktu dari alat pengukur dapat bervariasi tergantung dari alat ukur yang digunakan. Pada kasus ini harga  $\tau$  dipilih sebesar 20 detik. Pada keadaan jenuh (untuk tekanan 6 MPa), secara pendekatan  $T_a$  dapat dihubungkan dengan tekanan  $P_p$  sebagai :

$$T_a = 9,146 \times 10^{-5} P_p - 273,16 \quad (3.20)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (3.19) dan (3.20) diperoleh :

$$T_i = 5,6125 \times 10^{-7} P_p - 0,05 T_i + 10,4116 \quad (3.21)$$

Persamaan (3.9), (3.10) dan (3.21) adalah set dari tiga persamaan differensial non-linier yang merupakan penghubung terhadap model dinamika sistem pressurizer.

### 3.2. Linierisasi Persamaan Differensial Non-linier

Ketiga persamaan (3.9), (3.10) dan (3.21) adalah persamaan differensial non-linier dengan bentuk :

$$x = f(x, u) \quad (3.22)$$

$$y = c(x) \quad (3.24)$$

dimana vektor-vektor dari sistem, yaitu vektor keadaan, input dan outputnya berturut-turut adalah sebagai berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \chi_p \\ P_p \\ T_i \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \text{Kualitas uap pada pressurizer} \\ \text{Tekanan pressurizer} \\ \text{Suhu terukur pressurizer} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$u = \begin{bmatrix} W_{surge} \\ W_{spray} \\ W_{rv} \\ Q_h \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \text{Aliran surge pressurizer} \\ \text{Aliran spray pressurizer} \\ \text{Aliran katup pengaman} \\ \text{Pemanas pressurizer} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$y = \begin{bmatrix} \chi_p \\ P_p \\ T_i \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \text{Kualitas uap dalam pressurizer} \\ \text{Tekanan pressurizer} \\ \text{Suhu terukur pressurizer} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Level air pressurizer  $L_p$  dapat ditambahkan sebagai output, dimana dapat ditentukan dari harga variabel keadaan kualitas uap  $\chi_p$  dan tekanan  $P_p$ :

$$L_p = K(1 - \chi_p) \frac{v_f}{v_p} \quad (3.28)$$

dimana K adalah tetapan geometri tabung pressurizer yang besarnya = 1,1905 m. Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa  $L_p$  adalah fungsi dari kualitas uap  $\chi_p$  dan tekanan  $P_p$ , karena  $v_f$  dan  $v_p$  masing-masing tergantung dari  $P_p$ . Sekarang bentuk outputnya menjadi :

$$y = \begin{bmatrix} L_p \\ \chi_p \\ P_p \\ T_i \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \text{Level air pressurizer} \\ \text{Kualitas uap dalam pressurizer} \\ \text{Tekanan pressurizer} \\ \text{Suhu terukur pressurizer} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Untuk proses linierisasi persamaan differensial non-linier (3.22) di-ekspansikan ke dalam deret Taylor disekitar titik operasi nominal  $(\bar{x}, \bar{u})$  dan dengan mengabaikan bentuk orde dua keatas, diperoleh bentuk persamaan linier sebagai berikut<sup>[6, 10, 13]</sup> :

$$\delta x(t) = A \delta x(t) + B \delta u(t) \quad (3.30)$$

$$\text{dimana } A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(\bar{x}, \bar{u})} \text{ dan } B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(\bar{x}, \bar{u})}$$

$$\delta x(t) = x(t) - \bar{x}, \text{ dan } \delta u(t) = u(t) - \bar{u}$$

Secara sama persamaan (3.24) akan menghasilkan :

$$y(t) = C \delta x(t) \quad (3.31)$$

Persamaan (3.30) dan (3.31) merupakan persamaan linier, dimana dalam linierisasi tersebut diperoleh matriks A, B dan C. Sedangkan  $\bar{u}$ ,  $\bar{x}$  dan  $\bar{y}$  masing-masing adalah titik operasi normal dari input, keadaan dan output. Matriks A, B dan C berturut-turut sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 5,6125 \times 10^{-7} & -0,05 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$B = \begin{bmatrix} -2,1508 \times 10^{-3} & -2,6767 \times 10^{-3} & -1,1218 \times 10^{-3} & 6,6593 \times 10^{-10} \\ 5,3900 \times 10^4 & -5,5235 \times 10^5 & -1,2399 \times 10^6 & 0,7572 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$C = \begin{bmatrix} -0,9818 & 4,0761 \times 10^{-8} & 0,0 \\ 1,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 1,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Sehingga diperoleh persamaan model pressurizer kontinu, linier sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \delta \chi_p \\ \delta \dot{P}_p \\ \delta \dot{T}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 5,6125 \times 10^{-7} & -0,05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \chi_p \\ \delta P_p \\ \delta T_i \end{bmatrix} + \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} -2,1716 \times 10^{-3} & -2,5599 \times 10^{-3} & -1,4119 \times 10^{-3} & 4,8502 \times 10^{-10} \\ 5,5992 \times 10^4 & -5,7299 \times 10^5 & -1,2865 \times 10^6 & 0,7856 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{avg} \\ W_{spray} \\ W_{rv} \\ Q_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta L_p \\ \delta \chi_p \\ \delta P_p \\ \delta T_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,0133 & 3,7638 \times 10^{-8} & 0,0 \\ 1,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 1,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \chi_p \\ \delta P_p \\ \delta T_i \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Sedangkan titik operasi nominal model pressurizer tersebut adalah :

$$\chi = [\chi_{p0} \quad P_{p0} \quad T_{i0}]^T = \begin{bmatrix} 0,00741 \\ 6,0 \times 10^6 \\ 275,6 \end{bmatrix}, P_{p0} = \text{Pa}; T_{i0} = \text{°C} \quad (3.37)$$

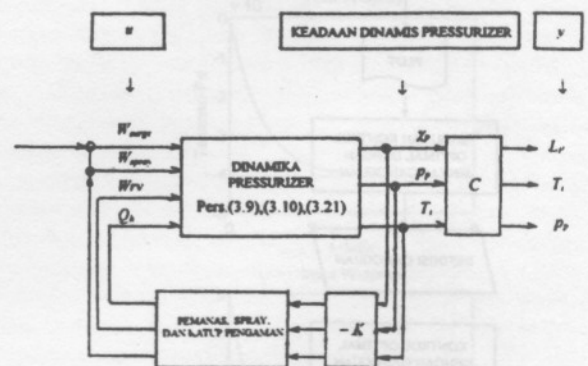
$$u = [W_{avg} \quad W_{spray} \quad W_{rv} \quad Q_s]^T = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}, W = \text{Kg/s} \quad (3.38)$$

$$y = [L_p \quad \chi_{p0} \quad P_{p0} \quad T_{i0}] = \begin{bmatrix} 1,0223 \\ 0,00741 \\ 6,0 \times 10^6 \\ 275,6 \end{bmatrix}, L_p = \text{meter} \quad (3.39)$$

#### 4. RANCANGAN SISTEM KONTROL PRESSURIZER

Pada rancangan sistem kontrol tekanan pressurizer disini, strategi yang digunakan adalah kontrol

optimal dengan umpan balik keadaan (*state feedback*) dan performansi kuadratik. Secara skematik rancangan dari sistem kontrol tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.1 . : Rancangan sistem kontrol pressurizer, dimana  $u$  adalah input,  $K$  adalah gain regulator optimal dan  $y$  adalah output.

Adapun langkah-langkah pengontrolan ini dapat dituliskan seperti algoritma berikut :

## 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1. Hasil

Dengan menggunakan matriks bobot

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad R = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

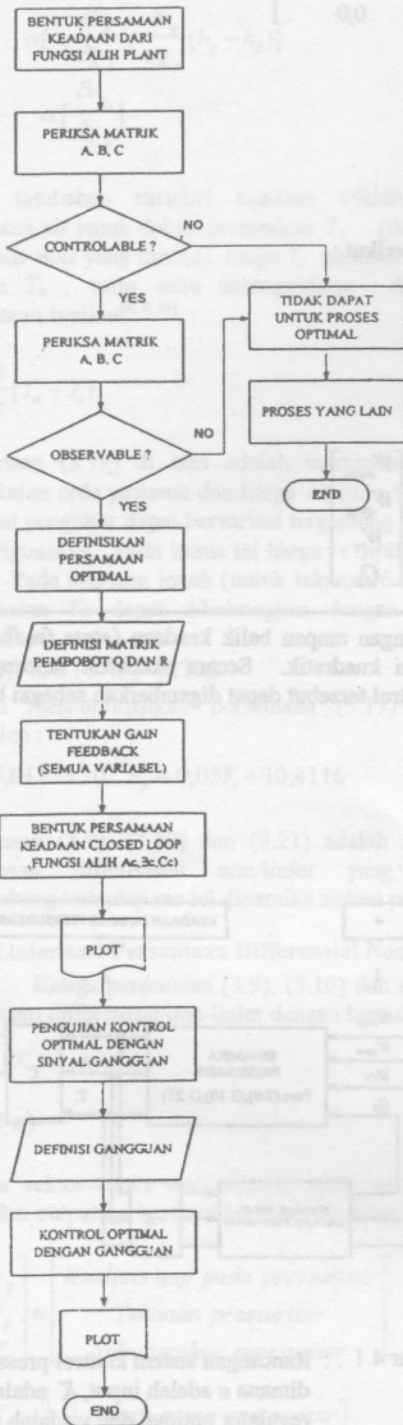
respon waktu aktual dan terkontrol pressurizer oleh adanya input tangga (*step-input*) dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ) dan laju aliran spray ( $W_{spray}$ ), dapat dilihat pada Gambar 5.1 sampai dengan Gambar 5.4 dan respon waktu aktual dan terkontrol pressurizer oleh adanya input pulsa dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ) dan laju aliran spray ( $W_{spray}$ ), dapat dilihat pada Gambar 5.5 sampai dengan Gambar 5.8.

### 5.2. Pembahasan

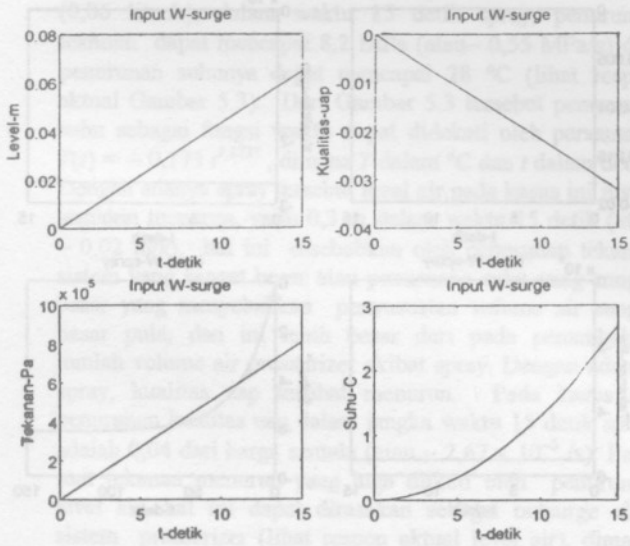
#### 5.2.1. Respon Waktu Pressurizer Oleh Adanya Input Tangga (Step-Input)

Dari hasil yang diperoleh pada Gambar 5.1 dan 5.2, yaitu respon waktu pressurizer (aktual dan terkontrol) oleh adanya input laju aliran surge  $W_{surge}$ , yang berarti bahwa pressurizer pada saat ini mengalami insurge, sehingga terjadi kenaikan tekanan. Dari respon aktual terlihat bahwa dengan meningkatnya jumlah cairan dalam pressurizer oleh karena terjadi insurge, yaitu 0,062 m kenaikan level air dalam waktu 15 detik atau sekitar 2 liter volume air yang masuk dalam waktu 15 detik ( $0,13 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) dapat meningkatkan tekanan sebesar 0,8 MPa atau 0,053 MPa/s. Sedangkan kenaikan suhu pada proses insurge ini dalam 15 detik dapat mencapai 2,8 °C. Kenaikan suhu sebagai fungsi waktu dari Gambar V.1 dapat didekati oleh persamaan  $T(t) = 0,018 t^{1,849}$ , dimana  $T$  dalam °C dan  $t$  dalam detik. Sedangkan kualitas uap pada kasus insurge ini menurun sebesar  $0,0315 (-2,1 \times 10^{-3}/\text{s})$ . Begitu plant mengalami kenaikan tekanan maka spray air dari *cold-leg* bekerja. Disini air spray dalam kasus yang sebenarnya berfungsi meng-kondensasikan uap sedemikian rupa sehingga dapat menurunkan tekanan. Dalam kasus ini pengaruh spray adalah menurunkan suhu dan dengan demikian akan diikuti oleh penurunan tekanan. Karena input tangga maka dapat diartikan bahwa kejadian insurge ini terus menerus sehingga tekanan dan suhu hanya dapat dipertahankan pada keadaan steady di sekitar keadaan awalnya. Pada kasus ini tekanan dapat dipertahankan steady pada sekitar 0,04 MPa di atas keadaan awalnya. Sedangkan suhu dapat dipertahankan pada 0,45 °C di atas keadaan awalnya. Pencapaian steady ini untuk tekanan sekitar 5 detik sedangkan untuk suhu sekitar 125 detik (lihat Gambar 5.2).

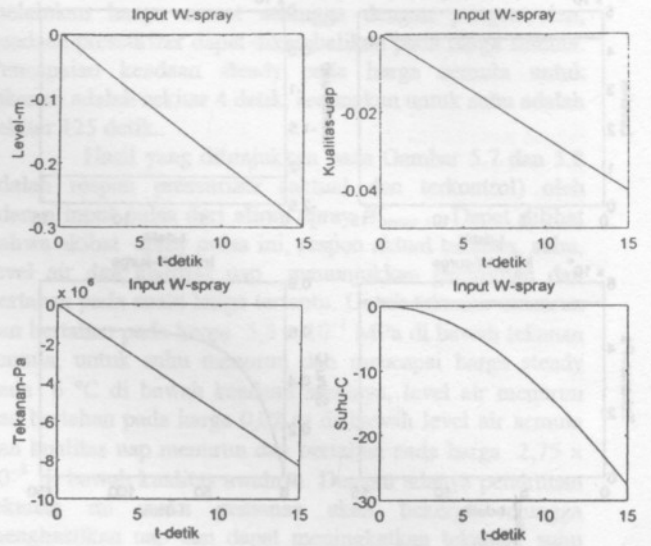
Dari hasil yang diperoleh pada Gambar 5.3 dan 5.4, yaitu respon waktu pressurizer (aktual dan terkontrol) oleh adanya input laju aliran spray  $W_{spray}$ , terlihat bahwa



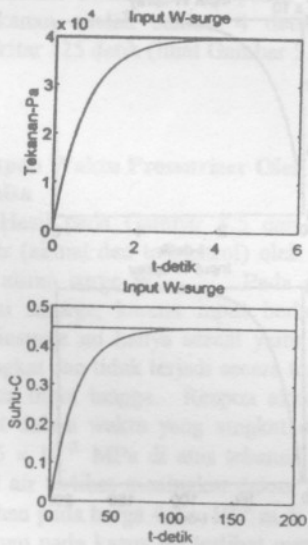




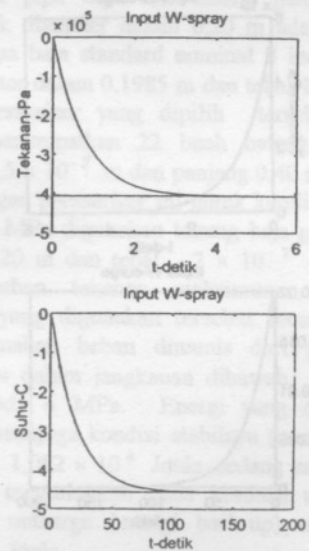
Gambar 5.1. : Respon pressurizer aktual oleh adanya input tangga dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ).



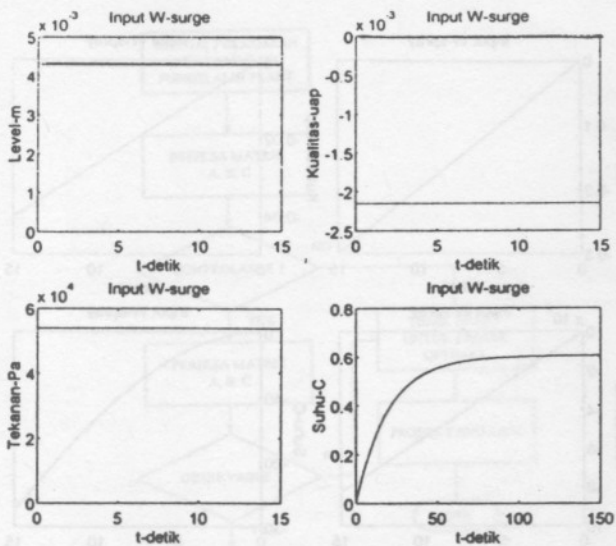
Gambar 5.3. : Respon pressurizer aktual oleh adanya input tangga dari laju aliran spray ( $W_{spray}$ ).



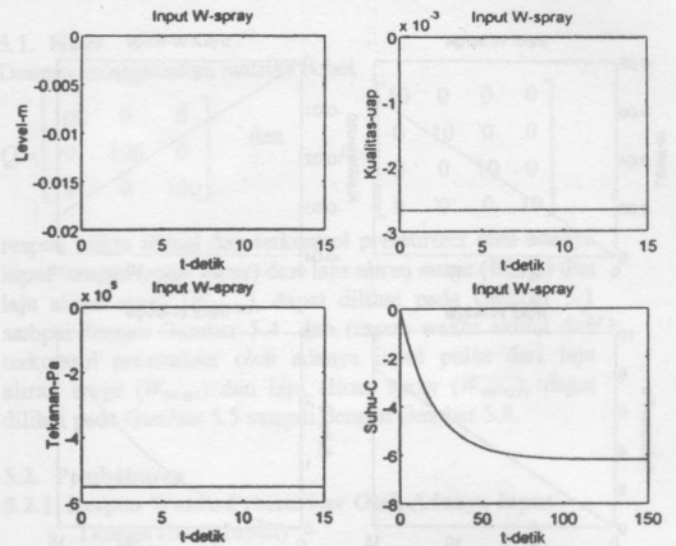
Gambar 5.2. : Respon pressurizer terkontrol oleh adanya input tangga dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ).



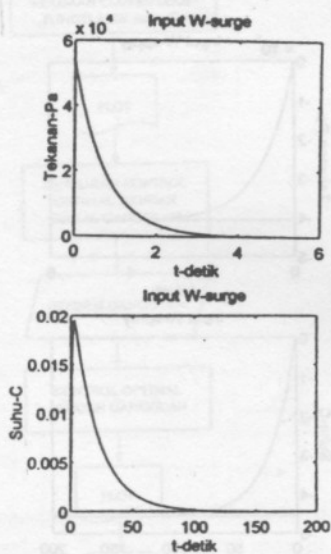
Gambar 5.4. : Respon pressurizer terkontrol oleh adanya input tangga dari laju aliran spray ( $W_{spray}$ ).



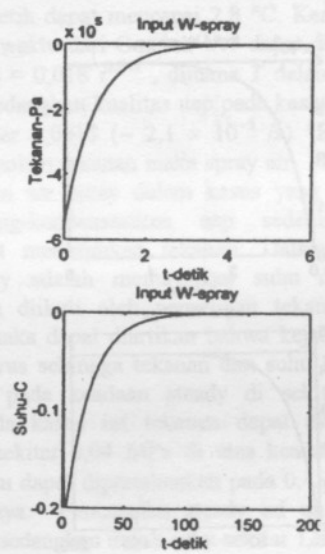
Gambar 5.5. : Respon pressurizer aktual oleh adanya input pulsa dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ).



Gambar 5.7. : Respon pressurizer aktual oleh adanya input pulsa dari laju aliran spray ( $W_{spray}$ ).



Gambar 5.6. : Respon pressurizer terkontrol oleh adanya input pulsa dari laju aliran surge ( $W_{surge}$ ).



Gambar 5.8. : Respon pressurizer terkontrol oleh adanya input pulsa dari laju aliran spray ( $W_{spray}$ ).

pengaruh spray ini sangat besar terhadap penurunan tekanan dan suhu. Dengan adanya spray sebesar  $0,06 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (0,06 liter/s), dalam waktu 15 detik spray, penurunan tekanan dapat mencapai 8,2 MPa (atau  $-0,55 \text{ MPa/s}$ ) dan penurunan suhunya dapat mencapai  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  (lihat respon aktual Gambar 5.3). Dari Gambar 5.3 tersebut penurunan suhu sebagai fungsi waktu dapat didekati oleh persamaan  $T(t) = -0,173 t^{1,8737}$ , dimana  $T$  dalam  $^\circ\text{C}$  dan  $t$  dalam detik. Dengan adanya spray tersebut level air pada kasus ini justru semakin menurun, yaitu 0,3 m dalam waktu 15 detik (atau  $-0,02 \text{ m/s}$ ), hal ini disebabkan oleh penurunan tekanan sistem yang sangat besar atau penurunan suhu yang sangat besar yang menyebabkan penyusutan volume air sangat besar pula, dan ini lebih besar dari pada penambahan jumlah volume air pressurizer akibat spray. Dengan adanya spray, kualitas uap terlihat menurun. Pada kasus ini penurunan kualitas uap dalam jangka waktu 15 detik spray adalah 0,04 dari harga semula (atau  $-2,67 \times 10^{-3}/\text{s}$ ). Pada saat tekanan menurun yang juga diikuti oleh penurunan level air, hal ini dapat dirasakan sebagai outsurge oleh sistem pressurizer (lihat respon aktual level air), dimana kelajuan outsurge ini adalah 0,628 liter setiap detik. Oleh karena gejala ini dirasakan sebagai outsurge, maka sistem pemanas pressurizer akan bekerja dan terjadi kenaikan suhu sehingga tekanannya menjadi naik kembali. Karena proses outsurge ini terus-menerus (karena input spray berupa tangga) maka penurunan tekanan, suhu dan kualitas uap disini hanya dapat dipertahankan pada keadaan steady sedikit di bawah keadaan awalnya. Untuk tekanan, keadaan steady ini sekitar 0,4 MPa di bawah tekanan awalnya, sedang untuk suhu keadaan steady ini adalah  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  di bawah keadaan awalnya. Pencapaian keadaan steady ini untuk tekanan adalah sekitar 4 detik dan untuk suhu adalah sekitar 125 detik (lihat Gambar 5.4)

### 5.2.2. Respon Waktu Pressurizer Oleh Adanya Input Pulsa

Hasil pada Gambar 5.5 dan 5.6 adalah respon pressurizer (aktual dan terkontrol) oleh adanya input pulsa dari laju aliran surge  $W_{\text{surge}}$ . Pada saat ini pressurizer mengalami insurge, karena input berbentuk pulsa, maka kejadian insurge ini hanya sesaat yaitu dalam waktu yang sangat singkat dan tidak terjadi secara terus menerus seperti pada kasus input tangga. Respon aktual tekanan terlihat meningkat dalam waktu yang singkat dan bertahan pada harga  $5,5 \times 10^{-2} \text{ MPa}$  di atas tekanan awalnya, demikian juga level air terlihat meningkat dalam waktu yang singkat dan bertahan pada harga  $4,3 \times 10^{-3} \text{ m}$  di atas level awalnya. Kualitas uap pada kasus ini terlihat menurun dan bertahan pada harga  $2,2 \times 10^{-3}$  di bawah harga awalnya, sedangkan suhu terlihat meningkat sampai  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$  pada keadaan steady di atas suhu awalnya. Pada saat plant mengalami kenaikan tekanan maka spray bekerja sehingga tekanan dapat dikembalikan pada keadaan awalnya. Hal ini berbeda

dengan kasus pertama, karena pada kasus ini input berupa pulsa maka input tidak terjadi secara terus-menerus melainkan hanya sesaat sehingga dengan pengontrolan, keadaan pressurizer dapat dikembalikan pada harga semula. Pencapaian keadaan steady pada harga semula untuk tekanan adalah sekitar 4 detik, sedangkan untuk suhu adalah sekitar 125 detik.

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 5.7 dan 5.8 adalah respon pressurizer (aktual dan terkontrol) oleh adanya input pulsa dari aliran spray  $W_{\text{spray}}$ . Dapat dilihat bahwa akibat spray pulsa ini, respon aktual tekanan, suhu, level air dan kualitas uap menunjukkan penurunan dan bertahan pada suatu harga tertentu. Untuk tekanan menurun dan bertahan pada harga  $5,5 \times 10^{-1} \text{ MPa}$  di bawah tekanan semula, untuk suhu menurun dan mencapai harga steady pada  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  di bawah keadaan awalnya, level air menurun dan bertahan pada harga 0,02 m di bawah level air semula dan kualitas uap menurun dan bertahan pada harga  $2,75 \times 10^{-3}$  di bawah kualitas awalnya. Dengan adanya penurunan tekanan ini maka pemanas akan bekerja sehingga menghasilkan uap dan dapat meningkatkan tekanan, suhu dan kualitas uap untuk mencapai keadaan awalnya. Pencapaian keadaan steady untuk tekanan adalah sekitar 5 detik. Untuk suhu sekitar 125 detik.

## 6. SARAN DAN KESIMPULAN

Dalam rancangan pressurizer ini, dipilih diameter dalam ( $d_o$ ) 0,20 m dan tinggi 1,22 m. Pemilihan ini didasarkan atas kriteria bahan atau komponen dasar pressurizer seperti pipa baja dan batang pemanas tipe immersion. Untuk diameter dalam 0,20 m adalah sesuai dengan ukuran pipa baja standard nominal 8 inch, skedul no.60, yaitu diameter dalam 0,1985 m dan tebal  $1,03 \times 10^{-2} \text{ m}$ . Dimensi pressurizer yang dipilih tersebut masih memungkinkan menempatkan 22 buah batang pemanas dengan diameter  $1,5 \times 10^{-2} \text{ m}$  dan panjang 0,40 m. Dalam prakteknya rancangan pressurizer ini untuk kondisi tekanan operasi nominal 6 MPa digunakan tabung baja gas dengan diameter dalam 0,20 m dan tebal  $2 \times 10^{-2} \text{ m}$  dengan kemampuan menahan tekanan maksimum 15 MPa. Sehingga tabung yang digunakan tersebut secara praktis akan mampu menahan beban dinamis dari perubahan tekanan pressurizer dalam jangkauan dibawah  $\pm 1 \text{ MPa}$  dari keadaan steady 6 MPa. Energi yang diperlukan pressurizer untuk menjaga kondisi stabilnya (energi siklis) maksimum adalah  $1,082 \times 10^6 \text{ Joule}$ , sedang energi yang diperlukan untuk memulihkan pada keadaan awal oleh adanya gangguan outsurge (energi back-up) maksimum adalah  $2,85 \times 10^6 \text{ Joule}$ .

Sistem kontrol yang diterapkan disini adalah kontrol optimal yang diperoleh melalui perhitungan matematis. Pada situasi praktis keterbatasan sistem ini adalah pada indeks performansinya, sehingga untuk implementasinya perlu dirancang terlebih dahulu suatu

sistem yang sederhana yang dapat mendekati perilaku optimal dengan membuat sistem fisik prototipe, menguji dan memodifikasi sampai diperoleh sistem yang baik yang mempunyai karakteristik performansi mendekati sistem kontrol optimal yang disintesis dengan menggunakan teori kontrol optimal.

Respon waktu aktual yang diperoleh menunjukkan bahwa pada kasus insurge dengan kelajuan surge  $0,13 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dapat meningkatkan tekanan sebesar  $0,053 \text{ MPa/s}$ . Suhu meningkat sebagai fungsi waktu dan dapat didekati oleh bentuk persamaan  $T(t) = 0,018 t^{1,849}$ , dimana  $T$  dalam  $^{\circ}\text{C}$  dan  $t$  dalam detik (dalam 15 detik dapat meningkatkan suhu sebesar  $2,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dan kualitas uap menurun sebesar  $-2,1 \times 10^{-3} / \text{s}$ . Pengaruh spray sangat besar terhadap penurunan tekanan dan suhu. Dengan laju spray  $0,06 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  dalam waktu 15 detik dapat menurunkan tekanan sebesar  $8,2 \text{ MPa}$  (atau  $-0,55 \text{ MPa/s}$ ) dan menurunkan suhu sebesar  $27,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , dimana bentuk penurunan suhu sebagai fungsi waktu oleh adanya spray ini dapat didekati oleh bentuk persamaan  $T(t) = -0,173 t^{1,8737}$ . Sedangkan kualitas uap dengan adanya spray ini menurun sebesar  $-2,67 \times 10^{-3} / \text{s}$  (atau dalam 15 detik kualitas uap menurun sebesar  $0,04$ ). Perlu dicatat bahwa dengan adanya spray level air justru semakin turun, dalam waktu 15 detik spray, penurunan level air ini mencapai  $0,3 \text{ m}$  (atau menurun dengan laju  $-0,02 \text{ m/s}$ ), hal ini disebabkan oleh penurunan tekanan atau penurunan suhu yang besar sehingga penyusutan volume air di dalam sistem pressurizer ini akan lebih besar dari pada penambahan volume air akibat spray.

Respon waktu terkontrol yang diperoleh menunjukkan bahwa pemulihan tekanan pada keadaan steady oleh adanya gangguan (insurge maupun outsurge) rata-rata sangat cepat hanya sekitar 4 sampai 5 detik, sedang untuk suhu pencapaian keadaan steady rata-rata sekitar 125 detik.

Dalam pemodelan pressurizer disini banyak mengabaikan hal-hal yang penting, yaitu diantaranya : Superheating dari uap selama insurge; Subcooled water dalam ruang cairan; Lenyapnya cairan menjadi uap; Kondensasi uap oleh spray, oleh dinding dan oleh permukaan cairan; Tidak seragamnya campuran uap-air selama insurge; dan Kerugian panas melalui dinding atau pemodelan yang dilakukan disini adalah pressurizer satu daerah, yang mana dalam pemodelan satu daerah ini uap dan air diasumsikan tercampur dengan sempurna dan keadaan uap dan air dapat diwakili oleh kualitas uapnya. Pemodelan yang lebih realistis adalah melalui pendekatan pressurizer dua daerah dan lebih realistis lagi adalah melalui pendekatan pressurizer empat daerah. Dalam pendekatan dua daerah ini diasumsikan bahwa pressurizer mempunyai tekanan tunggal dan hanya mempunyai daerah uap di atas dan daerah cairan di bawah. Air penyemprot diasumsikan seketika mencapai cairan bawah bersama uap yang terkondensasi melalui dinding pressurizer, demikian juga gelembung-gelembung uap yang lenyap diasumsikan

secara langsung menambah jumlah uap yang berada pada bagian atas. Dalam pendekatan empat daerah dipikirkan bagian atas pressurizer terdiri dari fase uap (kontinyu) dan fase cair (diskrit) dalam bentuk tetes-tetes cairan atau dalam bentuk kondensasi melalui dinding pressurizer. Sedang bagian bawah pressurizer terdiri dari fase cair (kontinyu) dan gelembung-gelembung uap yang naik (diskrit), dimana proses-proses perpindahan massa, kerja dan panas dapat melintasi antar-muka antar-muka tertentu dari keempat bagian tersebut. Namun demikian karakteristik dari pemodelan pressurizer satu daerah ini secara kualitatif mirip dengan pressurizer sesungguhnya dan telah berperan dengan baik dalam LOFT (loos-of-fluid test)<sup>[6]</sup>.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. NEIL E. TODREAS and MUJID S. KAZIMI, " Nuclear System I ", Hemisphere Publishing Corporation, p. 257-287, (1990).
2. SORENSEN, HARRY A, " Energy Conversion System ", John Wiley & Sons, Inc. p. 334-337, (1983).
3. M.M. EL-WAKIL, " Power Plant Technology ", Mc. Graw-Hill, Inc. p. 395-411, (1984).
4. FRANK KREITH, " Prinsip-prinsip Perpindahan Panas ", Edisi ketiga, Alih Bahasa Oleh Arko Prijono MSc., Erlangga, Jakarta (1991).
5. HADI SAADAT, " Computational Aids in Control System Using Matlab™ ", Mc. Graw-Hill, Inc. (1993).
6. R.N CLARK, " Instrumen Fault Detection in a Pressurized Water Reactor Pressurizer", Nuclear Technology Vol. 56, Jan. (1982).
7. J. LOUIS TYLEE, " A Generalized Likelihood Ratio Approach to Detecting and Identifying Failures in Pressurizer Instrumentation ", Nuclear Technology, Vol. 56 Mar. (1982).
8. J. LOUIS TYLEE, " On-line Failure Detection in Nuclear Power Plant Instrumentation ", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-28, No. 3, March (1983).
9. KATSUHIKO OGATA, " Teknik Kontrol Automatik " (Sistem Pengaturan) Jilid 1 & 2, Alih Bahasa Ir. Edi Leksono, Erlangga, Jakarta (1991).
10. HACK YEONG CHUNG and SOON HEUNG CHANG, " Development of a Combined Algorithm of On-line Instruments Failure Detection with an Improved Generalized Likelihood Ratio Method and Suboptimal Control on a PWR Pressurizer", Nuclear Technology Vol. 74, Aug (1986).
11. STEVEN J. ECKERT and KENNETH A. LOPARO, " An Application of Nonlinear Filtering to Instrument Failure Detection in a Pressurized Water Reactor ", Nuclear Technology, Vol. 74 Aug. (1986).
12. JOSEPH S. ROSKO, " Digital Simulation of Physical Systems ", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1972).
13. GEORGE STEPHANOPOULOS, " Chemical Process Control ", An Introduction to Theory and Practice, Prentice- Hall, Inc. (1984).
14. JOSEPH E. SHIGLEY and LARRY D. MITCHELL, " Perencanaan Teknik Mesin", Edisi ke-4, Jilid 1, Alih Bahasa Gandhi Harahap M. Eng., Erlangga, Jakarta (1986).
15. M. F. SPOTTS, "Design of Machine Elements ", Sixth Edition, Prentice- Hall, Inc. (1985).
16. R. J. WIDODO, " Sistem Pengaturan Modern ", Diktat Kuliah, ITB, Maret (1986).
17. WILLIAM C. REYNOLDS, HENRY C. PERKINS, " Termodinamika Teknik", Alih Bahasa oleh Filino Harahap, Erlangga, Jakarta (1989).
18. JOHN R. LAMARSH, " Introduction to Nuclear Engineering", 2nd. edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1983).