

---

## PEMODELAN SISTEM TUNGKU AUTOCLAVE ME-24

**Sugeng Rianto**

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek Gd. 65 Tangerang Selatan

### ABSTRAK

**PEMODELAN SISTEM TUNGKU AUTOCLAVE ME-24.** Autoclave model ME – 24 yang ada di Laboratorium Instalasi Elemen Bakar Eksperimental PTBN – BATAN berfungsi untuk meningkatkan kekuatan berkas elemen bakar nuklir terhadap korosi, dimana pada pengerjaan autoclaving ini akan terbentuk lapisan pelindung oksida-ZrO<sub>2</sub> pada permukaan batang elemen bakar nuklir. Pada makalah ini dibahas pemodelan sistem tungku autoclave secara eksperimen langsung pada alat, dengan melakukan pengujian pada tiap masukan pada sistem *heater* alat autoclave. Dari pengujian *heater* ini kemudian dibuat model matematis dalam bentuk model orde satu ditambah *delay*. Model matematis yang didapat menunjukkan bahwa sistem tungku autoclave merupakan model MIMO dengan matriks 3x4 dalam bentuk model fungsi alih. Model fungsi alih yang didapat, selanjutnya digunakan dalam studi lanjut untuk membuat sistem kendalinya, sehingga didapat sistem kerja autoclave yang optimal.

Katakunci : Fungsi Alih, Pemodelan sistem, Tungku Autoclave.

### PENDAHULUAN

Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) merupakan salah satu Instalasi nuklir di PTBN – BATAN yang salah satu fungsinya untuk melaksanakan pengembangan teknologi produksi bahan bakar reaktor daya (PLTN), khususnya dalam pengembangan fabrikasi berkas bahan bakar reaktor air berat tipe HWR-cirene dengan bahan bakar nuklir berbasis pelet UO<sub>2</sub> sinter dalam kelongsong Zirkaloy kedap<sup>[1]</sup>.

Salah satu pengujian untuk meningkatkan kekuatan berkas Elemen Bakar Nuklir terhadap korosi, dilakukan pengerjaan *autoclaving* yang merupakan tahap terakhir dari proses fabrikasi. Proses *autoclaving* berfungsi untuk proses pasivasi elemen bakar nuklir sehingga terbentuk lapisan pelindung (lapisan tipis oksida-ZrO<sub>2</sub>) pada permukaan batang elemen bakar nuklir yang berfungsi untuk menahan korosi<sup>[2]</sup>. *Autoclaving* dilakukan dalam tungku autoclave yang berisi uap air pada temperatur sekitar 400°C dan tekanan 10 atm selama waktu operasi 24 jam. Untuk lebih meningkatkan unjuk kerja alat tungku autoclave ini, dilakukan perancangan sistem kendali autoclave berbasis komputer, yang sebelumnya dilakukan dengan controller biasa.

Sebagai tahap awal dari perancangan sistem kendali autoclave ini, maka akan dilakukan identifikasi sistem guna mendapatkan model sistem alat autoclave secara eksperimen dengan memberikan fungsi *step* terhadap masukan. Respon keluaran fungsi *step* berupa kenaikan temperatur alat ini, kemudian dibuat modelnya. Hasil dari model ini kemudian menjadi acuan dalam membuat sistem kendali autoclave, sehingga tingkat akurasi dari pengendalian alat akan lebih tinggi.

## TEORI

Sistem Tungku Autoclave :

*Autoclave* secara umum adalah suatu perangkat yang digunakan untuk pasifasi (membuat pasif) material logam guna menekan laju korosi logam tersebut, dengan kondisi pasif ini, logam akan memiliki laju korosi yang rendah (Gambar 1). Khusus untuk autoclave model ME – 24 yang ada di Laboratorium Instalasi Elemen Bakar Eksperimental PTBN – BATAN berfungsi untuk meningkatkan kekuatan berkas elemen bakar nuklir terhadap korosi. Pada proses autoclaving ini akan terbentuk lapisan pelindung (lapisan tipis oksida-ZrO<sub>2</sub>) pada permukaan batang elemen bakar nuklir.<sup>[3]</sup>

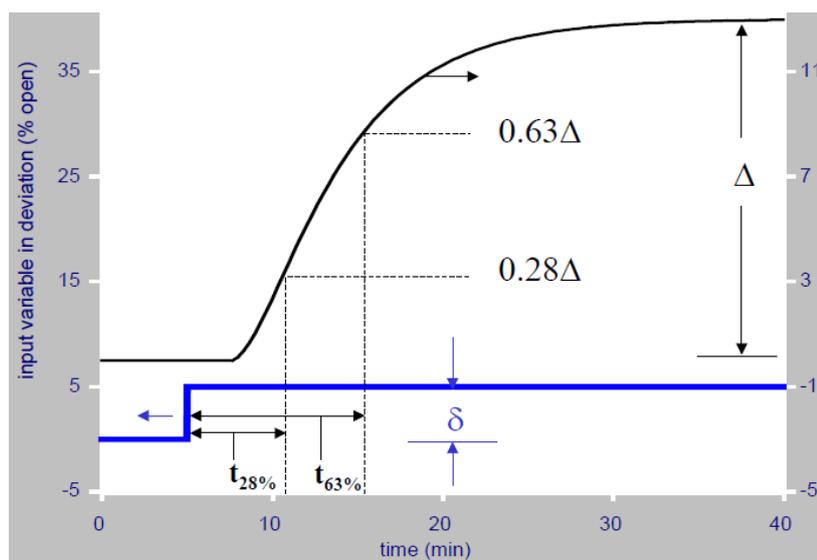
Nilai temperatur pada *chamber* autoclave harus dibuat konstan guna terbentuknya lapisan oksida lapisan pelindung oksida zirkaloy pada permukaan kelongsong elemen bakar nuklir. Kestabilan suhu ini berpengaruh terhadap kerataan permukaan kelongsong elemen bakar nuklir. Faktor yang mempengaruhi ketidakstabilan suhu pada *chamber* autoclave ini adalah bahwa sistem pemanas yang bekerja selain berfungsi untuk menaikkan suhu air dan uap air, juga digunakan untuk mengubah fasa air dari zat cair menjadi uap, selain itu juga sistem tekanan uap air yang spontan naik sebanding dengan peningkatan suhu uap air<sup>[3]</sup>.

Proses Autoclaving dilakukan dalam tungku autoclave yang berisi uap air jenuh pada temperatur kerja 400 °C dan tekanan sampai dengan 10 bar selama waktu 24 jam. Proses autoclaving ini yang merupakan tahap terakhir dari tahapan proses fabrikasi elemen bakar nuklir<sup>[4]</sup>.

Gambar 1. Sistem Tungku *Autoclave*

#### Identifikasi Sistem :

Identifikasi sistem digunakan untuk menentukan model dari suatu sistem yang disusun berdasarkan kurva reaksi yang diperoleh dari uji tanggap sistem terbuka (*open loop*) dengan fungsi *step*. Dengan model *ciancone*, hasil identifikasi sistem ini kemudian didapatkan model matematis dengan pendekatan sistem orde satu ditambah *delay* sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2 [5].

Gambar 2. Menentukan model dengan *ciancone*

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penentuan model matematis adalah sebagai berikut <sup>[5]</sup> :

- a. Melakukan pendekatan orde 1 terhadap data empiris, mula-mula dihitung penguatan proporsional ( $K_p$ ) yang merupakan nilai keluaran ( $\Delta$ ) pada saat mapan dibagi nilai masukan ( $\delta$ ).

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta}$$

- b. Menentukan konstanta waktu ( $\tau$ ) dengan mencari waktu yang diperlukan untuk mencapai 28% dari keadaan mapan ( $t_{28\%}$ ) dan waktu yang diperlukan untuk mencapai 63% keadaan mapan ( $t_{63\%}$ ) dengan persamaan :

$$\tau = 1,5 (t_{63\%} - t_{28\%})$$

- c. Selanjutnya adalah mencari waktu tunda ( $\theta$ ) dengan persamaan :

$$\theta = t_{63\%} - \tau$$

- d. Membuat model orde 1 dengan persamaan :

$$G(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

## METODA

Langkah-langkah dalam membuat model alat tungku autoclave adalah dengan melakukan pengujian pada tiap masukan pada sistem *heater* alat autoclave. Dari pengujian *heater* ini, respon suhu tiap daerah tungku diukur dengan alat termokopel. Hasil pengukuran ini kemudian dibuat model matematis secara eksperimen dari sistem tungku autoclave.

Sebelum dilakukan pengujian alat, maka diperlukan persyaratan sistem alat tungku autoclave yaitu <sup>[6]</sup> :

1. kondisi alat sebelum dilakukan pengujian ada dalam kondisi suhu kamar dan tekanan atmosfer, dengan kondisi alat pada tiap pengujian adalah sama.
2. Memeriksa sistem mekanik dengan dipastikan tidak ada kebocoran pada alat.
3. Memeriksa sistem elektrik dari bahaya hubungan singkat.

Pengujian sistem adalah :

Langkah 1: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 1*

Setelah membuat sistem perangkat lunak pengujian, maka identifikasi proses selanjutnya adalah pengujian untuk menentukan tiga keluaran  $y(s)$  pada masukan

*heater zona 1*  $u_1(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi step pada *heater 1* dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 80%, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada termokopel *chamber*. Waktu sampling yang dilakukan adalah 2 detik.

Langkah 2: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 2*

Langkah ini dilakukan sama dengan langkah 1, dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 70%, *heater zona 2*.

Langkah 3: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 3*

Langkah ini dilakukan sama dengan langkah 2, dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 70%, pada *heater zona 3*.

Langkah 4: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 4*

Langkah ini dilakukan sama dengan langkah 3, dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 60%, pada *heater zona 4*.

Langkah 5: *Menentukan model alat dari hasil pengujian*

Setelah dilakukan pengujian untuk keseluruhan, maka dibuat model sistem alat dalam bentuk blok diagram fungsi alih.

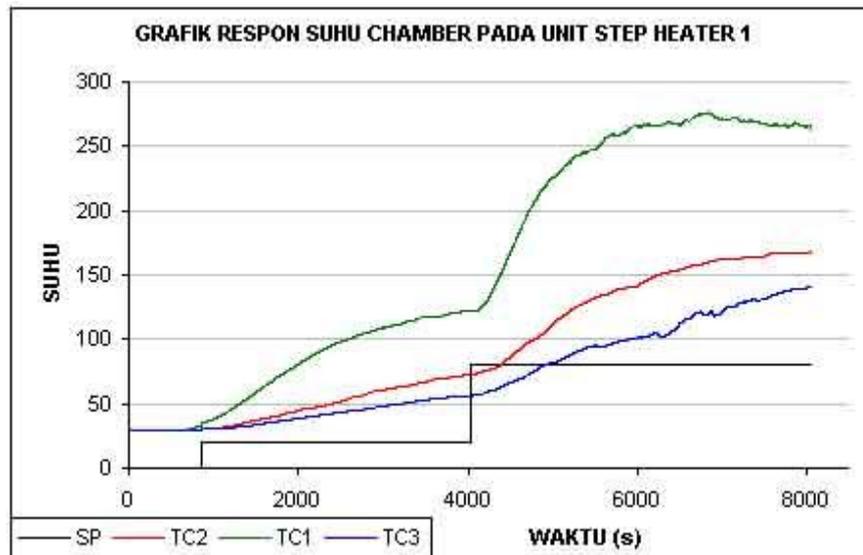
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pegujian fungsi *Step Heater* :

Pengujian *heater* guna mendapatkan model sistem *heater* autoclave, dilakukan secara berurutan, yaitu dengan memberikan fungsi *step* sinyal PWM, pada tiap *heater* sampai nilai *steady state* untuk tiap perubahan nilai *duty cycle*.

1. Pengujian Fungsi *Step Heater* Zona 1 :

Pengujian digunakan guna menentukan besar keluaran  $y(s)$  atau respon suhu untuk masukan  $u_1(s)$ . Pengujian dilakukan dengan memberi fungsi *step* pada *heater 1*, kemudian diukur respon keluarannya pada termokopel *chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater 1* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik respon suhu *chamber* dengan unit *step* untuk *heater* 1

Dengan menggunakan identifikasi model sebagaimana yang telah diuraikan pada dasar teori diatas, didapat model untuk pengujian *heater* zona 1 sebagai berikut :

- a. Menentukan  $G_{11}(s)$

Dari grafik gambar 3. diatas, didapat parameter untuk  $G_{11}(s)$  :

$$Kp = 1,8033 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 564 \text{ detik} \quad \theta = 235 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{11}(s) = \frac{1,8033 \cdot e^{-235 s}}{564 s + 1}$$

- b. Menentukan  $G_{21}(s)$

Dari grafik gambar 3. diatas, didapat parameter untuk didapat untuk  $G_{21}(s)$  :

$$Kp = 1,2554 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1307 \text{ detik} \quad \theta = 265 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{21}(s) = \frac{1,2554 \cdot e^{-265 s}}{1307 s + 1}$$

c. Menentukan  $G_{31}(s)$ 

Dari grafik gambar 3. diatas, didapat parameter untuk didapat untuk  $G_{31}(s)$  :

$$Kp = 1,415 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

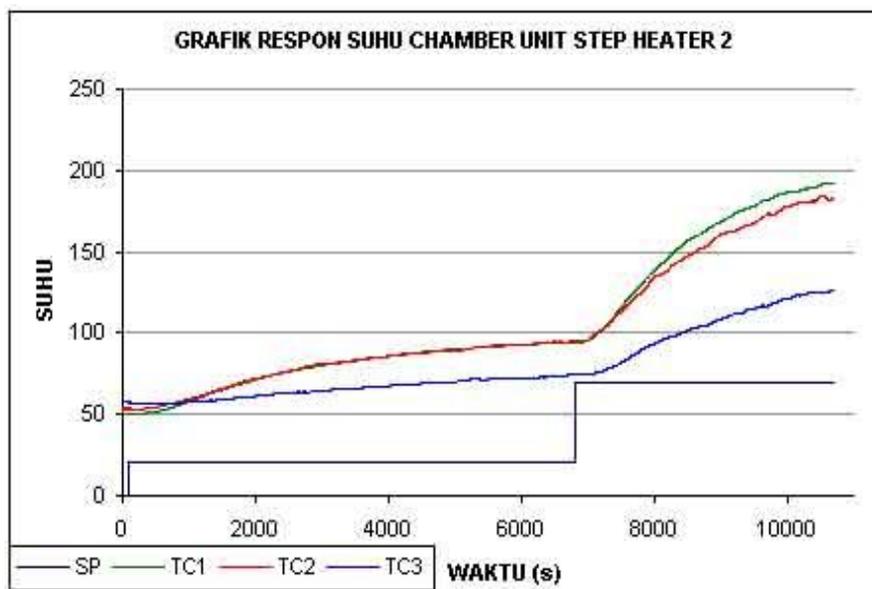
$$\tau = 2955 \text{ detik} \quad \theta = 335 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{31}(s) = \frac{1,415 \cdot e^{-335 s}}{2955 s + 1}$$

2. Pengujian Fungsi *Step Heater* Zona 2 :

Pengujian digunakan untuk menentukan keluaran  $y(s)$  pada pada masukan  $u_2(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada *heater 2*, dan melihat respon pada tiga keluarannya pada termokopel *chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater 2* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik respon suhu *chamber* dengan unit *step* untuk *heater 2*

a. Menentukan  $G_{12}(s)$ 

Dari grafik gambar 4. diatas, didapat parameter untuk  $G_{12}(s)$  :

$$Kp = 1,47 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1275 \text{ detik} \quad \theta = 395 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{12}(s) = \frac{1,47 \cdot e^{-395 s}}{1275 s + 1}$$

b. Menentukan  $G_{22}(s)$

Dari grafik gambar 4. diatas, didapat parameter untuk  $G_{22}(s)$  :

$$Kp = 1,388 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1558 \text{ detik} \quad \theta = 264 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{22}(s) = \frac{1,388 \cdot e^{-264 s}}{1558 s + 1}$$

c. Menentukan  $G_{32}(s)$

Dari grafik gambar 4. diatas, didapat parameter untuk  $G_{32}(s)$  :

$$Kp = 0,85 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

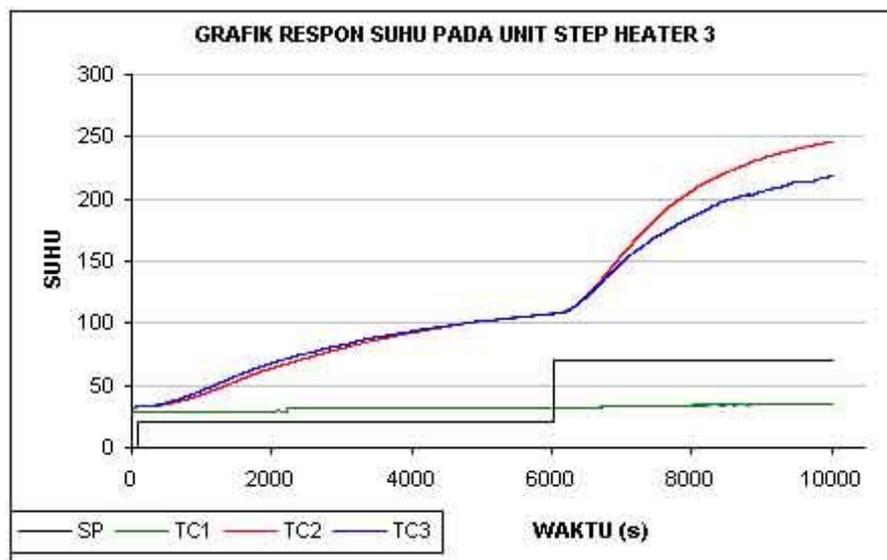
$$\tau = 1798 \text{ detik} \quad \theta = 402 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{32}(s) = \frac{0,85 \cdot e^{-402 s}}{1798 s + 1}$$

### 3. Pengujian Fungsi *Step Heater* Zona 3 :

Pengujian digunakan untuk menentukan keluaran  $y(s)$  pada masukan  $u_3(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada *heater* 3, dan melihat respon pada tiga keluarannya pada termokopel *chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater* 3 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik respon suhu *chamber* dengan unit *step* untuk *heater 3*

a. Menentukan  $G_{13}(s)$

Dari grafik gambar 5 diatas, didapat parameter untuk  $G_{13}(s)$  :

$$Kp = 0,0354 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 336 \text{ detik} \quad \theta = 828 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{13}(s) = \frac{0,0354 \cdot e^{-828 s}}{336 s + 1}$$

b. Menentukan  $G_{23}(s)$

Dari grafik gambar 5. diatas, didapat parameter untuk  $G_{23}(s)$  :

$$Kp = 2,08 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1245 \text{ detik} \quad \theta = 441 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{23}(s) = \frac{2,08 \cdot e^{-441 s}}{1245 s + 1}$$

c. Menentukan  $G_{33}(s)$

Dari grafik gambar 5. diatas, didapat parameter untuk  $G_{33}(s)$  :

$$Kp = 1,702 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

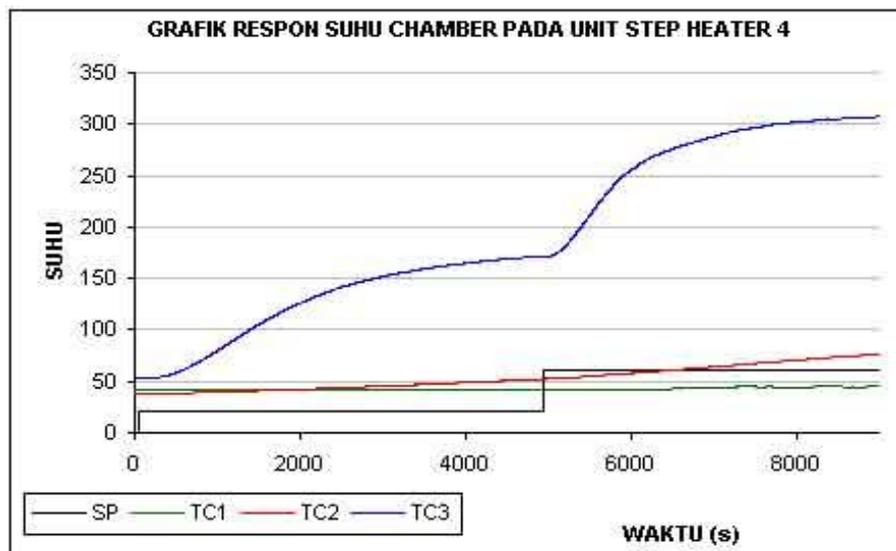
$$\tau = 1386 \text{ detik} \quad \theta = 340 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{33}(s) = \frac{1,702 \cdot e^{-340 s}}{1386 s + 1}$$

#### 4. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 4 :

Pengujian digunakan untuk menentukan keluaran  $y(s)$  pada pada masukan  $u_3(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada *heater* 4, dan melihat respon pada tiga keluarannya pada termokopel *chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater* 4 digambarkan di bawah ini.



Gambar 6. Grafik respon suhu *chamber* dengan unit *step* untuk *heater* 4

##### a. Menentukan $G_{14}(s)$

Dari grafik gambar 6. diatas, didapat parameter untuk  $G_{14}(s)$  :

$$Kp = 0,0525 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 690 \text{ detik} \quad \theta = 1238 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{14}(s) = \frac{0,0525 \cdot e^{-1238 s}}{690 s + 1}$$

b. Menentukan  $G_{24}(s)$

Dari grafik gambar 6. diatas, didapat parameter untuk  $G_{24}(s)$  :

$$Kp = 0,55475 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 2939 \text{ detik} \quad \theta = 333 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{24}(s) = \frac{0,55475 \cdot e^{-333 s}}{2939 s + 1}$$

c. Menentukan  $G_{34}(s)$

Dari grafik gambar 6. diatas, didapat parameter untuk  $G_{34}(s)$  :

$$Kp = 2,264 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 825 \text{ detik} \quad \theta = 265 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{34}(s) = \frac{2,264 \cdot e^{-265 s}}{825 s + 1}$$

5. Model Sistem Tungku Autoclave :

Dari ke empat pengujian di atas, maka bentuk model sistem tungku autoclave dapat menghasilkan matriks model 3 x 4. Dimana terdapat empat masukan dan tiga keluaran. Masukan yaitu  $u_1(s)$ ,  $u_2(s)$ ,  $u_3(s)$ , dan  $u_4(s)$ , sedangkan keluaran yaitu  $y_1(s)$ ,  $y_2(s)$ , dan  $y_3(s)$ . Bentuk matriks model autoclavenya adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) & G_{14}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) & G_{24}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) & G_{34}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \\ u_4(s) \end{bmatrix} \text{ atau}$$

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1,8033 \cdot e^{-235s}}{564s+1} & \frac{1,47 \cdot e^{-395s}}{1275s+1} & \frac{0,0354 \cdot e^{-828s}}{336s+1} & \frac{0,0525 \cdot e^{-1238s}}{690s+1} \\ \frac{1,2554 \cdot e^{-265s}}{1,2554 \cdot e^{-265s}} & \frac{1,388 \cdot e^{-264s}}{1,388 \cdot e^{-264s}} & \frac{2,08 \cdot e^{-441s}}{2,08 \cdot e^{-441s}} & \frac{0,55475 \cdot e^{-333s}}{0,55475 \cdot e^{-333s}} \\ \frac{1307s+1}{1,415 \cdot e^{-335s}} & \frac{1558s+1}{0,85 \cdot e^{-402s}} & \frac{1245s+1}{1,702 \cdot e^{-340s}} & \frac{2939s+1}{2,264 \cdot e^{-265s}} \\ \frac{2955s+1}{2955s+1} & \frac{1798s+1}{1798s+1} & \frac{1386s+1}{1386s+1} & \frac{825s+1}{825s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \\ u_4(s) \end{bmatrix}$$

## KESIMPULAN

Dalam penentuan model matematis yang dilakukan secara empiris dengan eksperimen secara langsung dengan penyederhanaan sistem keluaran didapat model MIMO dengan matriks 3x4 untuk bentuk fungsi alihnya. Model fungsi alih yang didapat dari eksperimen merupakan bentuk model orde satu ditambah *delay*, dengan asumsi respon tidak melewati nilai *set point* yang telah ditentukan atau *overshoot* mendekati 0. Model yang diperoleh ini, selanjutnya digunakan dalam studi lanjut untuk membuat sistem kendalinya, sehingga didapat sistem kerja autoclave yang optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B HERUTOMO, "Karakteristik Disain dan Operasi IEBC", Pusdiklat BATAN, tahun 2009.
- [2] NIRA, "ME 24 Passivation Autoclave Instruction Manual", tahun 1984.
- [3] SUNTORO A.Achmad, "Catatan Teknis Kendali Suhu ME-24 dan QE-12", BATAN, 2010
- [4] YULIANTO TRI, "Proses Fabrikasi Elemen Bakar Nuklir di IEBC", Pusdiklat BATAN, tahun 2009.
- [5] MARLIN E. THOMAS, "Process Control, Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance", Mc Graw-Hill, New York, tahun 1995
- [6] PREGLEJ A., KARBA R. STEINER i and SKRJANC I, "Mathematical Model of an autoclave", Journal of Mechanical Engineering, tahun 2011.