



Dinamika Proses pada Sistem Pemanas Tangki Berpengaduk dengan Arus *Bypass*

Yulius Deddy Hermawan^{1*}, Bambang Sugiarto¹,
I Gusti Ayu Sri Pradnyadewi¹, dan Gusti Ayu Septiandani¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, UPN "Veteran" Yogyakarta
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Yogyakarta 55283

*E-mail: ydhermawan@upnyk.ac.id

Abstract

The liquid concentration and temperature dynamic behavior of a stirred tank heater with bypass stream (STHB) has been studied experimentally. A cylinder tank was designed and arranged for experimentation in laboratory. The tank has two input streams, stream-1 (salt solution with its volumetric rate of f_1 [cm^3/sec], salt concentration of c_{g1} [gr/cm^3]) and stream-2 (water-stream with its volumetric rate of f_2 [cm^3/sec]). A part of the stream-1 was bypassed (f_3 [cm^3/sec]) and mixed with the output stream of the tank (f_5 [cm^3/sec]). The electric heater was employed for heating liquid in the tank. Since the tank was designed overflow, the liquid volume in tank was always constant. In this work, the mass and thermal disturbance load has been made based on step increase and decrease. Those disturbance included the changes of the bypass volumetric rate (f_3), the water volumetric rate (f_2), and the electric heat (q_e). The dynamic behavior of the STHB has also been explored. As can be seen from our investigation in laboratory, the STHB produced a stable response. Furthermore, the open loop dynamic simulation using computer programming was also done, and its simulation results were compared with the experiment data from laboratory. The developed mathematical model of the STHB has been solved numerically. Scilab software was chosen to examine such mathematical model. This study also revealed that the trends of simulation results were quite similar with those in our experiment results.

Keywords: Bypass, Dynamic Behavior, Step Function, Stirred-Tank-Heater, and Stable Response.

Pendahuluan

Komposisi dan suhu cairan di dalam sistem *Stirred Tank Heater with Bypass* (STHB) merupakan parameter penting dalam proses pencampuran dan pemanasan. Perambatan gangguan massa dan termal sangat mungkin terjadi pada proses pencampuran dan pemanasan. Sistem STHB sering dijumpai dalam industri/pabrik (sebagai *mixing tank* atau *reactor*), namun kajian dinamikanya jarang dijumpai. Oleh karena itu, penelitian ini dilaksanakan untuk mempelajari dinamika komposisi dan suhu pada STHB. Dengan mengenali kelakuan dinamis komposisi dan suhu pada STHB, diharapkan gangguan yang mungkin timbul dapat ditanggulangi secepat mungkin.

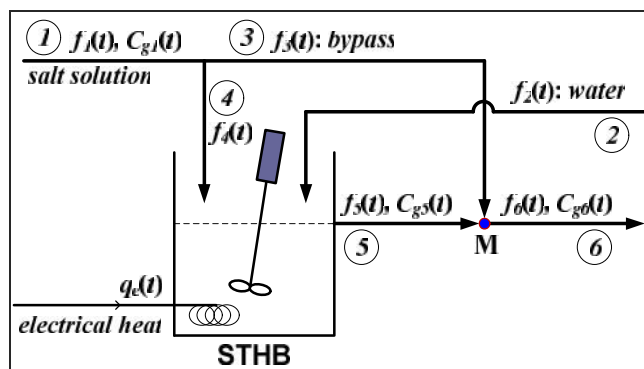
Beberapa penelitian tentang dinamika komposisi dan suhu telah dilakukan. Pada tahun 2010, Hermawan Y.D., dkk. telah membahas masalah perancangan pengendalian suhu dan *level* pada sistem tangki-seri-tak-saling-berinteraksi (*Non-Interacting-Tank*). Hermawan Y.D. (2012) selanjutnya melakukan kajian simulasi *loop* tertutup pada sistem *Non-Interacting-Tank*. Hermawan, Y.D., dkk. (2012) telah mempelajari dinamika komposisi pada tangki pencampur 10 L. Hermawan Y.D. dan Haryono G. (2012) kemudian melanjutkan penelitiannya dengan kajian simulasi dinamis dan pengendalian komposisi dalam tangki pencampur 10 L.

Dalam penelitian ini, sistem STHB dirancang di laboratorium. STHB berfungsi sebagai tangki pencampur dan pemanas sekaligus. Untuk mempelajari kelakuan dinamik pada sistem STHB, gangguan laju alir volumetrik arus *bypass*, dan panas listrik dibuat berdasarkan fungsi tahap (*step function*), karena pembuatan gangguan ini mudah dilakukan di laboratorium. Respons dinamis berdasarkan perubahan input diamati sampai diperoleh kondisi tunak (*steady state*) yang baru. Model matematika sistem STHB dibangun dan diselesaikan secara numerik menggunakan metode Runga-Kutta-4. Penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk mendukung perancangan pengendalian komposisi dan suhu pada sistem pemanas tangki berpengaduk dengan *bypass*.

Landasan Teori

STHB (*Stirred Tank Heater with Bypass*) ditunjukkan pada **Gambar 1**. Arus-1 adalah arus larutan garam dengan laju alir volumetrik $f_1(t)$ [cm^3/detik] dan konsentrasi garam C_{g1} [g/cm^3]. Arus-2 adalah arus air dengan laju alir volumetrik $f_2(t)$ [cm^3/detik]. Sebagian dari Arus-1 di *bypass* $f_3(t)$ dan bertemu dengan arus-5 (keluaran tangki).





Gambar 1. STHB (*Stirred Tank Heater with Bypass*)

Tangki dirancang *overflow*, sehingga volume fluida di dalam tangki selalu konstan. Tangki dilengkapi dengan pemanas listrik dan pengaduk. Pemanas listrik memberikan energi sebesar $q_e(t)$ [cal/detik]. Pengadukan diterapkan dengan maksud untuk menjamin keseragaman karakteristik fluida di dalam tangki. Dalam studi ini, kapasitas panas dan densitas fluida dianggap konstan, dan panas yang hilang dari sistem dianggap tidak ada. Neraca massa dan panas dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu: tangki dan titik M (pertemuan arus-3 dan arus-5, **Gambar 1**).

Neraca massa komponen garam di dalam tangki adalah sebagai berikut:

$$\frac{d(C_{g5}(t))}{dt} = \frac{(f_1(t) - f_3(t))\overline{C_{g1}} - (f_1(t) - f_3(t) + f_2(t))\overline{C_{g5}}(t)}{\overline{V}} \quad (1)$$

Neraca panas total di dalam tangki adalah sebagai berikut:

$$\frac{d(T_5(t))}{dt} = \frac{A + B - C - D + q_e(t)}{\overline{VE}} \quad (2)$$

dimana:

$$A = f_4(t) \cdot \overline{C_{g1}} \cdot \overline{cp_g} \cdot \overline{T_1} + f_4(t) \cdot \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a} \cdot \overline{T_1} \quad (3)$$

$$B = f_2(t) \cdot \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a} \cdot \overline{T_2} \quad (4)$$

$$C = f_5(t) \cdot \overline{C_{g5}}(t) \cdot \overline{cp_g} \cdot \overline{T_5}(t) + f_5(t) \cdot \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a} \cdot \overline{T_5}(t) \quad (5)$$

$$D = \overline{T_5} \cdot \overline{cp_{g5}} \cdot ((f_1(t) - f_3(t))\overline{C_{g1}} - (f_1(t) - f_3(t) + f_2(t))\overline{C_{g5}}(t)) \quad (6)$$

$$E = \overline{C_{g5}} \cdot \overline{cp_g} + \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a} \quad (7)$$

Konsentrasi garam dan suhu campuran arus-3 dan arus-5 (keluaran titik M) adalah sebagai berikut:

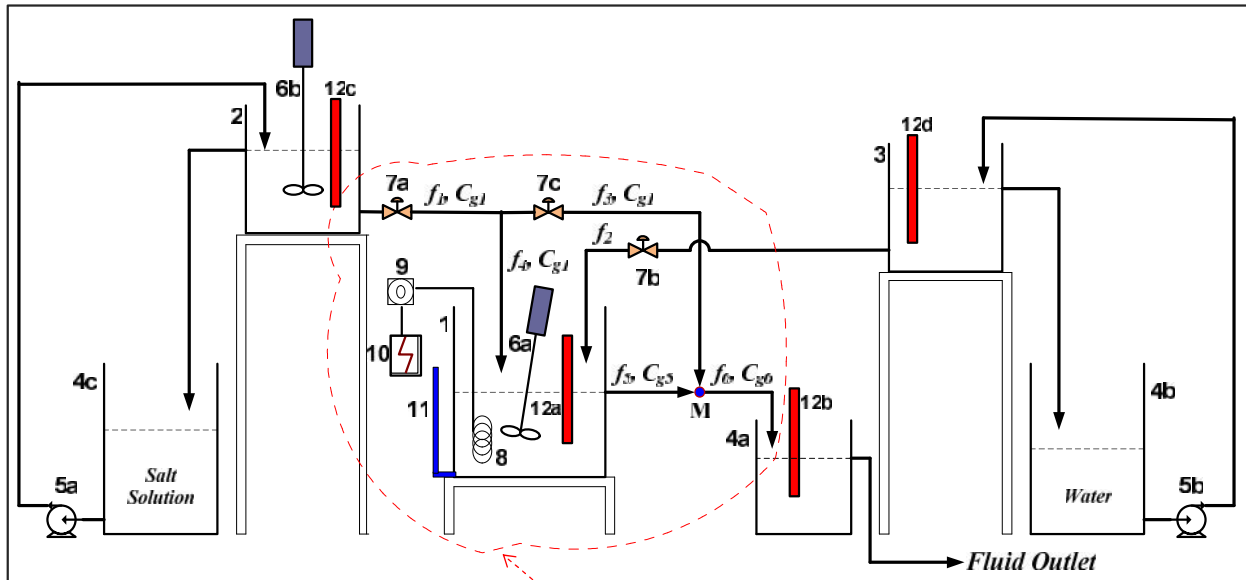
$$C_{g6}(t) = \frac{f_3(t)\overline{C_{g1}} + (f_1(t) - f_3(t) + f_2(t))\overline{C_{g5}}(t)}{f_1(t) + f_2(t)} \quad (8)$$

$$T_6(t) = \frac{(f_3(t) \cdot \overline{T_1})(\overline{C_{g1}} \cdot \overline{cp_g} + \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a}) + (f_5(t) \cdot \overline{T_5})(\overline{C_{g5}}(t) \cdot \overline{cp_g} + \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a})}{(f_1(t) + f_2(t))(\overline{C_{g6}}(t) \cdot \overline{cp_g} + \overline{C_a} \cdot \overline{cp_a})} \quad (9)$$

Metodologi

Rangkaian alat percobaan di laboratorium ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pada percobaan ini, arus-1 adalah larutan garam yang berasal dari tangki umpan arus-1 (No. 2 **Gambar 2**), dan arus-2 adalah air dari tangki umpan arus-2 (No. 3 **Gambar 2**). Laju alir volumetrik arus-1, arus-2, dan arus-3 dapat diatur dengan pengaturan bukaan *valve* 7a, 7b, dan 7c. Cairan di dalam STHB (No.1 **Gambar 2**) dipanasi dengan pemanas listrik (No. 8 **Gambar 2**); energi listrik dapat diatur dengan *watt-meter* (No. 9 **Gambar 2**). Percobaan ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- **Percobaan Pendahuluan:** untuk menentukan parameter-parameter kondisi tunak, yaitu: $\overline{f_1}$, $\overline{f_2}$, $\overline{f_3}$, $\overline{f_4}$, $\overline{f_5}$, $\overline{f_6}$, $\overline{C_{g1}}$, $\overline{C_{g5}}$, $\overline{C_{g6}}$, $\overline{T_1}$, $\overline{T_2}$, $\overline{T_5}$, $\overline{T_6}$, $\overline{q_e}$ dan \overline{V} . Suhu pada setiap arus diukur dengan *thermometer* (No. 12 **Gambar 2**). Sedangkan konsentrasi garam dalam arus-1, arus-5, dan arus-6 diukur dengan *conducto-meter*.



Keterangan:

- | | |
|-------------------------------------------|---------------------|
| 1. Stirred Tank Heater with Bypass (STHB) | 7. Valve |
| 2. Tangki umpan larutan garam | 8. Electric heater |
| 3. Tangki umpan air | 9. Watt-meter |
| 4. Tangki penampung | 10. Electricity |
| 5. Pompa transfer | 11. Level indicator |
| 6. Pengaduk | 12. Thermometer |

Gambar 2. Rangkaian Alat Percobaan

- **Percobaan Dinamis (Loop Terbuka):** Gangguan dibuat dengan mengurangi/menambah energi listrik $q_e(t)$ dan laju alir volumetrik arus-2 $f_2(t)$ dan arus-3 $f_3(t)$ berdasarkan fungsi tahap (*step decrease* dan *step increase*). Energi listrik dapat diubah menggunakan *watt-meter* (No. 9 **Gambar 2**), sedangkan laju alir volumetrik arus-2, dan arus-3 diubah menggunakan *valve* (No. 7b dan 7c **Gambar 2**). Kemudian, suhu dan konsentrasi garam pada arus-5 dan arus-6 diamati sampai diperoleh nilai tunak baru (*new steady state*).
- **Simulasi Model Matematika:** Sistem persamaan matematika STHB (persamaan (1), (2), (8), dan (9)) diselesaikan secara serempak menggunakan metode numerik Runga-Kutta-4. Simulasi penyelesaian model matematika dilakukan dengan bantuan *software* Scilab. Kemudian, hasil penyelesaian sistem persamaan tersebut diplotkan dalam grafik respons dan dibandingkan dengan data yang diperoleh dari percobaan laboratorium.

Hasil dan Pembahasan

Percobaan pendahuluan menghasilkan parameter-parameter kondisi tunak seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Berdasarkan hasil percobaan pendahuluan, diperoleh konstanta waktu proses (*process time constant*) 250 detik (4,2 menit). Hal ini berarti bahwa proses kurang sensitif terhadap perubahan input.

Tabel 1. Parameter Kondisi Tunak.

No	Parameter Tunak	Nilai Tunak
1	Laju alir volumetrik arus-1 (larutan garam), f_1 (cm ³ /detik)	26
2	Laju alir volumetrik arus-2 (air masuk tangki), f_2 (cm ³ /detik)	14
3	Laju alir volumetrik arus-3 (larutan garam yang <i>bypass</i>), f_3 (cm ³ /detik)	15
4	Laju alir volumetrik arus-4 (larutan garam masuk tangki), f_4 (cm ³ /detik)	11
5	Laju alir volumetrik arus-5 (larutan garam keluar tangki), f_5 (cm ³ /detik)	25
6	Laju alir volumetrik arus-6 (campuran arus-3 dan arus-5), f_6 (cm ³ /detik)	40
7	Konsentrasi garam dalam arus-1, c_{g1} (gr/cm ³)	0,1
8	Konsentrasi garam dalam arus-5, c_{g5} (gr/cm ³)	0.0441
9	Konsentrasi garam dalam arus-6, c_{g6} (gr/cm ³)	0.0651
10	Suhu arus-1, T_1 (°C)	26
11	Suhu arus-2, T_2 (°C)	26
12	Suhu arus-5, T_5 (°C)	32
13	Suhu arus-6, T_6 (°C)	29,7
14	Energi listrik, q_e (cal/detik)	149,7
15	Volume cairan di dalam tangki, V (cm ³)	10000
16	Level cairan, h (cm)	18

Hasil percobaan loop terbuka di laboratorium dan simulasi model matematika STHB adalah sebagai berikut:

Step decrease q_e (energi listrik) dengan beban $Uq_e = -42,8$ cal/detik

Energi listrik q_e diturunkan nilainya menurut fungsi tahap (*step decrease*) dari 149,7 cal/detik menjadi 106,9 cal/detik (**Gambar 3.a**). Penurunan energi listrik menyebabkan penurunan suhu T_5 dan T_6 (**Gambar 3.b**). Suhu T_5 dan T_6 mencapai nilai tunak baru 30,5 °C dan 28,9 °C pada waktu $t=1500$ detik (25 menit).

Step increase q_e (energi listrik) dengan beban $Uq_e = +42,8$ cal/detik

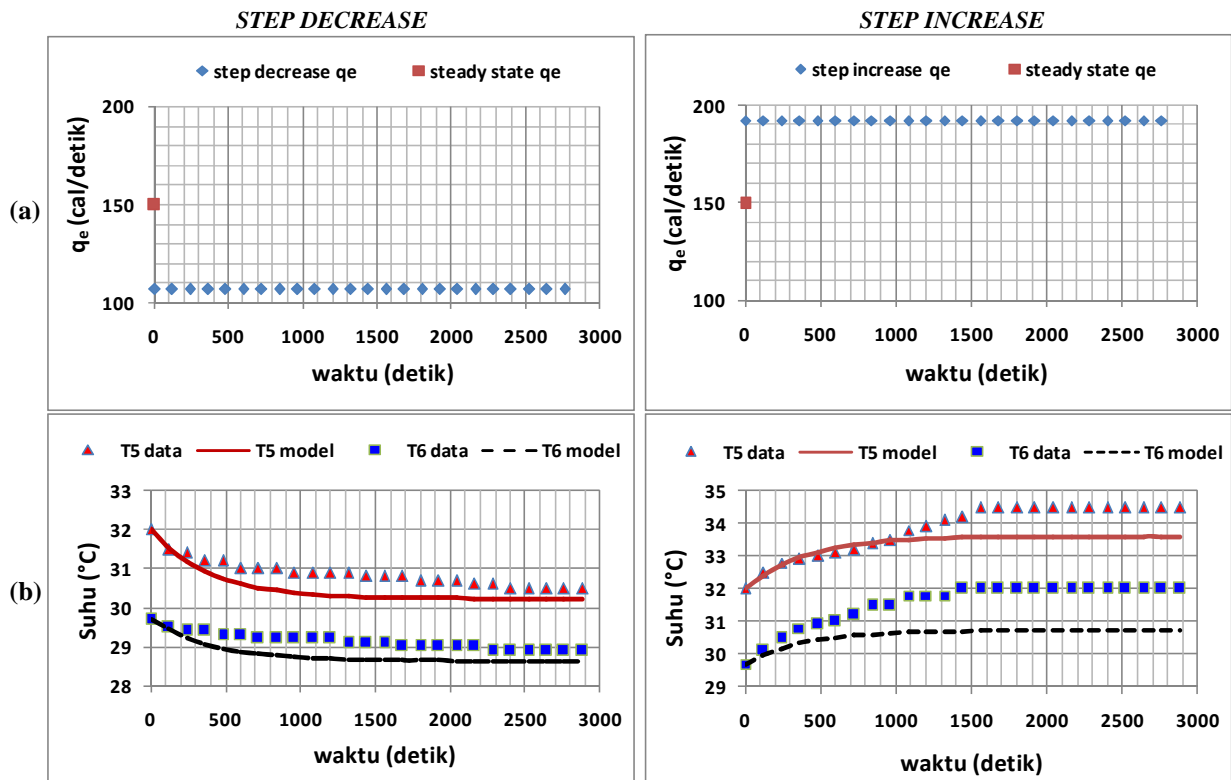
Energi listrik q_e dinaikkan nilainya menurut fungsi tahap (*step increase*) dari 149,7 cal/detik menjadi 192,5 cal/detik (**Gambar 3.a**). Seiring dengan naiknya energi listrik, suhu T_5 dan T_6 naik dan konstan pada nilai 34,5 °C dan 32 °C (**Gambar 3.b**). Nilai konstan tersebut tercapai pada waktu $t=1500$ detik (25 menit). Seperti yang ditunjukkan **Gambar 3.b**, respons suhu hasil simulasi model matematika STHB menunjukkan *trend* yang sama dengan data pengamatan laboratorium.

Step decrease f_2 (laju alir volumetrik air) dengan beban $Uf_2 = -4$ cm³/detik

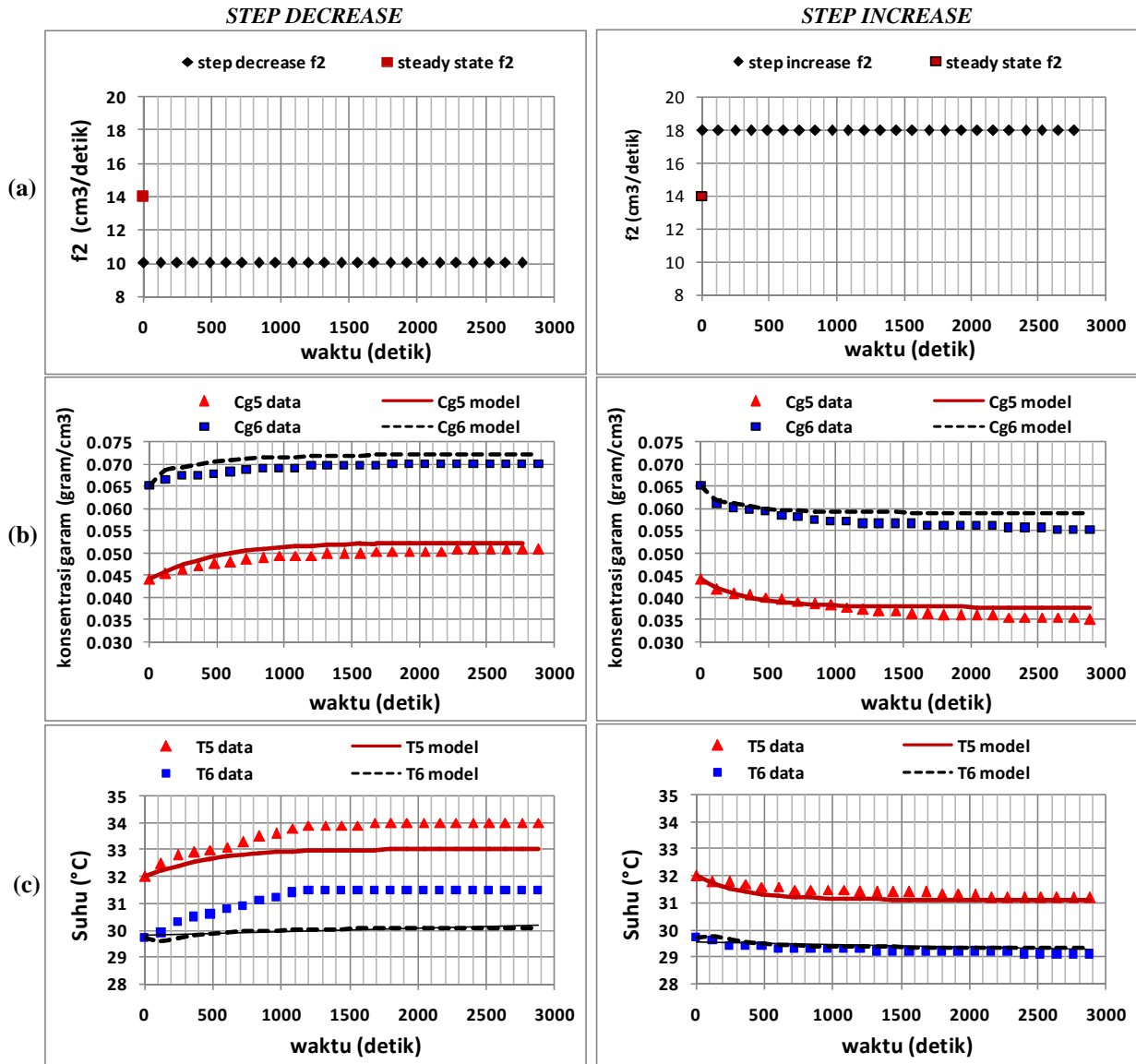
Laju alir volumetrik f_2 diturunkan nilainya menurut fungsi tahap (*step decrease*) dari 14 cm³/detik menjadi 10 cm³/detik (**Gambar 4.a**). Dapat dipahami bahwa dengan turunnya laju alir volumetrik air, konsentrasi garam C_{g5} dan C_{g6} naik dan akhirnya konstan pada nilai 0,05 g/cm³ dan 0,07 g/cm³ (**Gambar 4.b**). Dengan berkurangnya laju alir volumetrik air, suhu cairan di dalam tangki naik (**Gambar 4.c**). Kondisi tunak baru tercapai pada waktu $t=1800$ detik (30 menit).

Step increase f_2 (laju alir volumetrik air) dengan beban $Uf_2 = +4$ cm³/detik

Laju alir volumetrik f_2 dinaikkan nilainya menurut fungsi tahap (*step increase*) dari 14 cm³/detik menjadi 18 cm³/detik (**Gambar 4.a**). Konsentrasi garam C_{g5} dan C_{g6} turun seiring dengan naiknya laju alir volumetrik air. Konsentrasi garam C_{g5} dan C_{g6} mencapai nilai tunak baru 0,036 g/cm³ dan 0,059 g/cm³ (**Gambar 4.b**). Dengan naiknya laju alir volumetrik air, suhu cairan di dalam tangki turun (**Gambar 4.c**). Kondisi tunak baru tercapai pada waktu $t=1800$ detik (30 menit). Respons konsentrasi (**Gambar 4.b**) dan suhu (**Gambar 4.c**) hasil simulasi model matematika STHB menunjukkan *trend* yang sama dengan data pengamatan laboratorium.



Gambar 3. Respon dinamis sistem STHB terhadap perubahan energi listrik q_e :
(a). energi listrik q_e , (b) suhu T_5 dan T_6



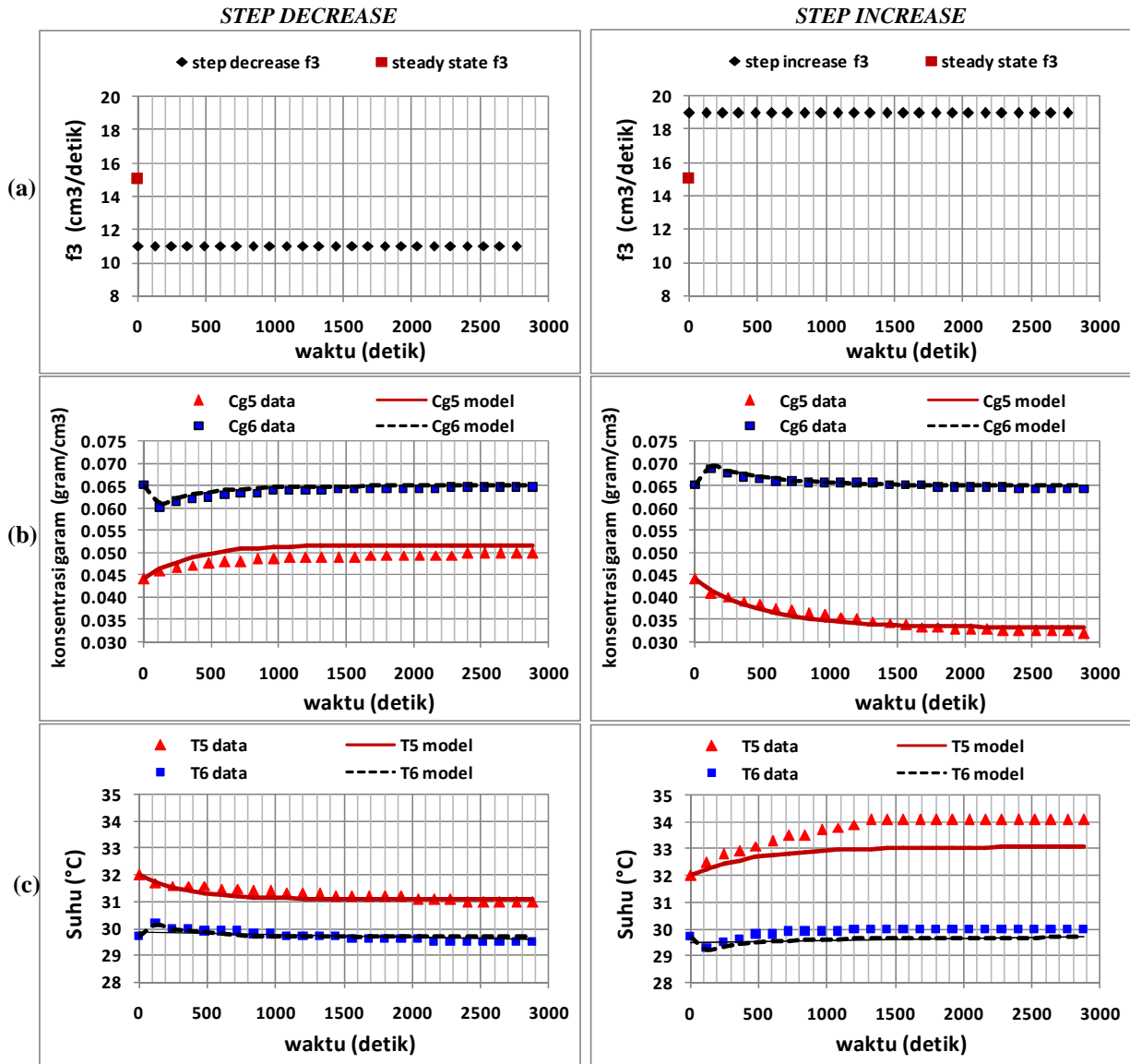
Gambar 4. Respon dinamis sistem STHB terhadap perubahan laju alir volumetrik f_2 (air):
(a). laju alir volumetrik f_2 , (b) konsentrasi garam C_{g5} dan C_{g6} , (c) suhu T_5 dan T_6

Step decrease f_3 (laju alir volumetrik larutan garam bypass) dengan beban $Uf_3 = -4 \text{ cm}^3/\text{detik}$

Laju alir volumetrik f_3 diturunkan nilainya menurut fungsi tahap (*step decrease*) dari $15 \text{ cm}^3/\text{detik}$ menjadi $11 \text{ cm}^3/\text{detik}$ (**Gambar 5.a**). Turunnya laju alir volumetrik arus *bypass* (f_3) menyebabkan naiknya laju alir volumetrik larutan garam masuk tangki (f_4), sehingga konsentrasi garam keluar tangki (C_{g5}) naik menjadi $0,049 \text{ g/cm}^3$. Namun, *inverse response* ditunjukkan pada arus-6 (campuran arus-3 dan arus-5). Konsentrasi garam C_{g6} awalnya turun kemudian naik sampai konstan pada nilai $0,0647 \text{ g/cm}^3$ (**Gambar 5.b**). Sedangkan suhu T_6 awalnya naik kemudian turun sampai konstan pada nilai $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai tunak baru tercapai pada waktu 2160 detik (36 menit).

Step increase f_3 (laju alir volumetrik larutan garam bypass) dengan beban $Uf_3 = +4 \text{ cm}^3/\text{detik}$

Laju alir volumetrik f_3 dinaikkan nilainya menurut fungsi tahap (*step increase*) dari $15 \text{ cm}^3/\text{detik}$ menjadi $19 \text{ cm}^3/\text{detik}$ (**Gambar 5.a**). Naiknya laju alir volumetrik arus *bypass* (f_3) menyebabkan turunnya laju alir volumetrik larutan garam masuk tangki (f_4), sehingga konsentrasi garam keluar tangki (C_{g5}) turun menjadi $0,0325 \text{ g/cm}^3$. *Inverse response* ditunjukkan pada arus-6 (campuran arus-3 dan arus-5). Konsentrasi garam C_{g6} awalnya naik kemudian turun sampai konstan pada nilai $0,0647 \text{ g/cm}^3$ (**Gambar 5.b**). Sedangkan suhu T_6 awalnya turun kemudian naik sampai konstan pada nilai $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai tunak baru tercapai pada waktu 2160 detik (36 menit).



Gambar 5. Respon dinamis sistem STHB terhadap perubahan laju alir volumetrik f_3 (bypass):
 (a). laju alir volumetrik f_3 , (b) konsentrasi garam C_{g5} dan C_{g6} , (c) suhu T_5 dan T_6

Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem STHB memberikan respons stabil terhadap perubahan gangguan energi listrik (q_e), laju alir volumetrik air (f_2), dan laju alir volumetrik arus *bypass* (f_3). *Inverse response* (respons terbalik) juga terjadi pada keluaran titik pencampuran arus *bypass* dan arus keluar tangki. *Inverse response* yang dihasilkan tersebut sering dijumpai pula pada sistem *proses-to-proses-heat-exchanger* dengan arus *bypass*. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa respons konsentrasi garam dan suhu fluida hasil simulasi model matematika dan hasil percobaan laboratorium menunjukkan perilaku dinamis (*dynamic behavior*) yang sama.

Daftar Notasi

- $\overline{cp_a}$: kapasitas panas air, konstan, 1, [cal/(g.°C)]
- $\overline{cp_g}$: kapasitas panas garam, konstan, 0,2721, [cal/(g.°C)]
- $C_{g1,5,6}$: konsentrasi garam dalam arus-1,5,6 pada kondisi awal t=0, [g/cm³]
- $C_{g1,5,6}(t)$: konsentrasi garam dalam arus-1,5,6 pada waktu t=t detik, [g/cm³]
- $\overline{f_{1,2,3,4,5,6}}$: laju alir volumetrik arus-1,2,3,4,5,6 pada kondisi awal t=0, [cm³/detik]



- $f_{1,2,3,4,5,6}(t)$: laju alir volumetrik arus-1,2,3,4,5,6 pada waktu $t=t$ detik, [cm^3/detik]
 \bar{h} : level cairan di dalam tangki, konstan, [cm]
 \bar{q}_e : energi listrik pada kondisi awal, $t=0$, [cal/detik]
 $q_e(t)$: energi listrik pada pada waktu $t=t$ detik, [cal/detik]
 $T_{1,2,3,4,5,6}$: suhu arus-1,2,3,4,5,6 pada kondisi awal $t=0$, [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{3,6}(t)$: suhu arus-5,6 pada waktu $t=t$ detik, [$^{\circ}\text{C}$]
 \bar{V} : volume cairan di dalam tangki, konstan, 10000 [cm^3]

Daftar Pustaka

- Hermawan Y.D., Suksmono Y., Narno Putra R.M., Puspitasari M., 2010, Perancangan Konfigurasi Pengendalian Proses pada Sistem Non-Interacting-Tank dengan Analisis Kuantitatif *Relative Gain Array*, *Seminar Nasional Teknologi Simulasi (TEKNOSIM) 2010*, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada: 75 – 8.
- Hermawan Y.D., 2012, Dynamic Simulation and Control in A Non-Interacting-Tank System, *19th Regional Symposium on Chemical Engineering*, Department of Chemical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, November 27-28, 2012, Bali, Indonesia: B-27-1 – B-27-6.
- Hermawan Y.D, Haryono G., Agustin M., Abiad H. 2012, Dinamika Komposisi pada Sistem Tangki Pencampur 10 L, *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" 2012*, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, UPN "Veteran" Yogyakarta: C15-1 – C15-6.
- Hermawan Y.D, and Haryono G., 2012, Dynamic Simulation and Composition Control in A 10 L Mixing Tank, *Jurnal Reaktor*, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Vol. 14, No. 2, Oktober 2012: 95 – 100.

