



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS

ARIF MUHAIMIN
NRP. 02311640000135

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

**Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020**



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS

ARIF MUHAIMIN
NRP. 02311640000135

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF DISTRIBUTED ESTIMATOR WITH OBSERVER
ON QUADRUPLE-TANK PROCESS***

ARIF MUHAIMIN
NRP. 02311640000135

Supervisors:
Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Arif Muhaimin
NRP : 02311640000135
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 21 Juni 2020

Yang membuat pernyataan,



Arif Muhaimin

NRP. 02311640000135

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER
PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS**

Oleh:

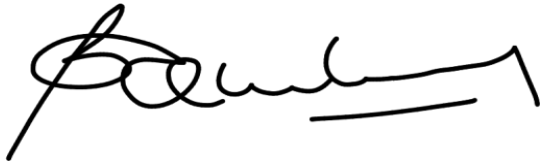


Arif Muhaimin

NRP. 02311640000135

Surabaya,

Menyetujui,
Pembimbing I



Menyetujui,
Pembimbing II



Dr. Bambang Lelono Widjiantoro S.T., M.T. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC
NIP. 1969052071995121001

Mengetahui,

Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS-ITS



Dr. Susanto, S.T., M.T.
NIP. 19171113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

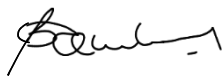



Oleh:



Arif Muhaimin

NRP. 02311640000135

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--|--|-----------------------|
| 1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. |  | (Pembimbing I) |
| 2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC |  | (Pembimbing II) |
| 3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. |  | (Ketua Penguji) |
| 4. Dr. Ridho Hantoro S.T., M.T. |  | (Penguji I) |

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS

Nama : Arif Muhaimin
NRP : 02311640000135
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono Widjiantoro S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

ABSTRAK

Dalam industri proses, kontrol level fluida pada tangki dan aliran antar tangki adalah permasalahan yang sering dijumpai. Juga, industri akan mendapatkan sistem yang besar, dinamis, kompleks, dan memiliki banyak variabel masukan dan keluaran. Tidak terkecuali sering dijumpai sistem non-linear. Estimasi *state* dari sistem dinamis dengan menggunakan *multi-agents* atau jaringan sensor, estimasi *state* terdistribusi mendapatkan banyak perhatian. *quadruple-tank process* merupakan sistem multivariabel yang digunakan. *Quadruple-tank process* adalah proses skala lab yang didesain untuk menggambarkan batas-batas performansi karena *zero location* pada sistem kontrol multivariabel. *Quadruple-tank process* terdiri dari tangki air yang saling terhubung dan dua pompa. Dimana tujuan dari sistem pengendalian pada quadruple-tank process adalah menjaga volume dari tangki guna menjalankan performanya. Setelah dilakukan pengujian, hasil perancangan estimator terdistribusi dimana respon state dan keluarannya sudah cukup mampu dapat *tracking* sesuai *true state* untuk estimasi state estimator dan set-point untuk keluaran estimator. Dengan hasil uji dengan kontroler PI desentralisasi ialah error rata-rata dari hasil respon state ialah 0.764031 % dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.431143 %. Sementara, hasil uji dengan kontroler PI tersentralisasi ialah error rata-rata dari hasil respon state ialah 2.8467 % dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.303449 %.

Kata Kunci: Estimasi Terdistribusi, *Observer*, *Quadruple-tank Process*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF DISTRIBUTED ESTIMATOR WITH OBSERVER ON QUADRUPLE-TANK PROCESS

Name : Arif Muhaimin
NRP : 02311640000135
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Dr. Bambang Lelono Widjiantoro S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

ABSTRACT

In the process industry, fluid level control of tanks and the flow between tanks is the most common problem. Also, the industry will get a large, dynamic, complex system, and has many variables input and output. No exception is often encountered non-linear systems. State Estimation of dynamic systems using multi-agents or network sensors, distributed State estimates get a lot of attention. quadruple-the process tank is a multivariable system used. Quadruple-tank process is a lab-scale process designed to illustrate the performance boundaries due to Zero location in multivariable control systems. The Quadruple-tank process consists of interconnected water tanks and two pumps. The purpose of the control system in the quadruple-tank process is to maintain the volume of the tank to perform its performance. After testing, the results of the design of the distributed estimator where the state response and output have been sufficiently able to be able to track true state for estimation of State Estimator and set-point for Output estimator. With The test result with a decentralized PI controller is the average error of the state response result is 0.764031 % and the average error of the output response result is 0.431143 %. Meanwhile, the test result WITH the centralized PI controller is the average error of the state response result is 2.8467 % and the average error of the output response result is 0.303449 %.

Keywords: Distributed Estimation, Observer, Quadruple-tank Process.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Sehingga penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul :

“ PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam program studi Departemen Teknik Fisika FTIRS-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta segenap keluarga yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan dalam bentuk apapun.
2. Bapak Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini dan bapak Moh. Kamalul Wafi S.T., M.T.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T.,M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS
4. Bapak Bagus Tri Atmaja S.T., M.T. dan Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan kepada penulis
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
6. Teman-teman saya Hebatulloh Fitroh Romadoni, Khana Medina Zaldian, dan Rahayu Nur Madina yang telah membantu, menemani, dan memberi dukungan moril dan semangat saya hingga saat ini.
7. Seluruh teman-teman Thalasinus Fortis yang berjuang bersama di jurusan Teknik Fisika ITS.
8. Teman Seperjuangan yang telah mengerjakan Tugas Akhir bidang minat rekayasa instrumentasi di Laboratorium Embedded and Cyber-Physical System.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 20 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

COVER PAGE	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Laporan	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Quadruple-tank Process</i>	5
2.1.1 Permodelan.....	6
2.1.2 Fungsi Transfer	11
2.2 Observer	11
2.3 Estimasi State Terdistribusi	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Studi literatur	17
3.2 Permodelan Quadruple-tank Process.....	18

3.3	Perancangan Estimasi Terdistribusi dengan Observer.....	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Hasil Uji Perancangan dengan <i>Quadruple-tank Process Open Loop</i>	25
4.2	Hasil Uji Perancangan dengan <i>Quadruple-tank Process Closed Loop</i> ..	25
4.3	Hasil Uji Perancangan dengan Kontroler PI Desentralisasi	27
4.4	Hasil Uji Perancangan dengan Kontroler PI Tersentralisasi.....	34
4.5	Analisa dan Pembahasan	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		41
5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....		43
LAMPIRAN		45
BIODATA PENULIS		55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Quadruple-tank Process	5
Gambar 2.2	Kesetimbangan Massa di Tangki 1	8
Gambar 2.3	Kesetimbangan Massa di Tangki 2	8
Gambar 2.4	Kesetimbangan Massa di Tangki 3	9
Gambar 2.5	Kesetimbangan Massa di Tangki 4	9
Gambar 2.6	Diagram blok <i>Quadruple-tank Process</i>	11
Gambar 2.7	Ilustrasi blok observer (Ogata, 2009)	12
Gambar 2.8	Kerangka Estimasi State Terdistribusi.....	13
Gambar 2.9	Topologi Sensor pada <i>Communication Graph</i>	14
Gambar 2.10	Diagram Blok Lokal Observer.....	14
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	17
Gambar 3.2	Diagram Blok dari <i>Quadruple-tank Process</i>	19
Gambar 3.3	Diagram Blok Plant	20
Gambar 3.4	Diagram Blok dari <i>Quadruple-tank Process</i> dengan kontroller PI Terdesentralisasi.....	21
Gambar 3.5	Diagram Blok dari <i>Quadruple-tank Process</i> dengan Kontroller PI Tersentralisasi	21
Gambar 3.6	Diagram Blok Estimasi Terdistribusi	22
Gambar 3.7	<i>Communication Graph</i> dari Node i dan j	23
Gambar 4.1	Diagram Blok Uji <i>Open Loop</i>	25
Gambar 4.2	Respon Uji <i>Plant Open Loop</i>	25
Gambar 4.3	Respon I dari Kontroller PI Terdesentralisasi	26
Gambar 4.4	Respon II dari dari Kontroller PI Terdesentralisasi	26

Gambar 4.5	Respon I dan II dengan Fungsi Step I dan II dari Kontroller PI Desentralisasi.....	27
Gambar 4.6	Respon State Uji No.1 Durasi 50 Sekon.....	28
Gambar 4.7	Respon State Uji No.1 Durasi 700 sekon.....	28
Gambar 4.8	Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 50 sekon.....	29
Gambar 4.9	Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 600 sekon.....	29
Gambar 4.10	Respon State Uji No.2 Durasi 50 sekon.....	30
Gambar 4.11	Respon State Uji No.2 Durasi 600 sekon.....	30
Gambar 4.12	Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 50 Sekon.....	31
Gambar 4.13	Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 700 sekon.....	31
Gambar 4.14	Respon State Uji No.3 Durasi 50 sekon.....	32
Gambar 4.15	Respon State Uji No.3 Durasi 600 sekon.....	32
Gambar 4.16	Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 50 sekon.....	32
Gambar 4.17	Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 600 sekon.....	33
Gambar 4.18	Respon State Uji No.1 Durasi 50 sekon.....	35
Gambar 4.19	Respon State Uji No.1 Durasi 600 sekon.....	35
Gambar 4.20	Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 50 sekon.....	35
Gambar 4.21	Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 600 sekon.....	36
Gambar 4.22	Respon State Uji No.2 Durasi 50 sekon.....	36
Gambar 4.23	Respon State Uji No.2 Durasi 600 sekon.....	37
Gambar 4.24	Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 50 sekon.....	37
Gambar 4.25	Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 600 sekon.....	37
Gambar 4.26	Respon State Uji No.3 Durasi 50 sekon.....	38
Gambar 4.27	Respon State Uji No.3 Durasi 600 sekon.....	38
Gambar 4.28	Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 50 sekon.....	39
Gambar 4.29	Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 600 sekon.....	39

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Tabel parameter Quadruple-tank Process.....	19
Tabel 3.2	Tabel parameter lokal observer	22
Tabel 4.1	Input Fungsi Step untuk Kontroller PI Desentralisasi.....	27
Tabel 4.2	Error Uji Perancangan dengan kontroler PI Desentralisasi.....	34
Tabel 4.3	Input Fungsi Step pada Kontroler PI Tersentralisasi.....	34
Tabel 4.4	Hasil Uji Perancangan dengan kontroler PI Tersentralisasi.....	40

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam industri proses, kontrol level fluida pada tangki dan aliran antar tangki adalah permasalahan yang sering dijumpai (Jayaprakash, Davidson, & Subha, Comparison of Controller Performance for MIMO Process, 2008). Juga, industri akan mendapatkan sistem yang besar, dinamis, kompleks, dan memiliki banyak variabel masukan dan keluaran. Tidak terkecuali sering dijumpai sistem non-linear. Di masa-masa ini, guna menjawab tantangan permintaan mengestimasi *state* dari sistem dinamis dengan menggunakan *multi-agents* atau jaringan sensor, estimasi *state* terdistribusi mendapatkan banyak perhatian (Taekyoo, Hyungbo, & Dan, 2016). *State* pada sistem dinamik berperan penting dalam teori sistem tersebut. Dimana *state* menunjukkan variabel dalam sistem dan respon untuk input yang diberikan ke sistem. Guna mengamati *state* dari sistem dapat digunakan *observer* dalam mengamati *state* pada sistem dinamik. Kemudian, konsep dari distribusi dalam sistem dan kontrol timbul akibat kompleksitas dan dimensionalitas dari banyak sistem dinamis skala besar (Saif & Guan, 1992). Dalam banyak kasus seperti permodelan sulit bahkan tidak mungkin untuk memaksakan struktur kontrol tertentu untuk metode desain standar multivariable (Henrik, 1997). Oleh karena itu, peran penting estimasi *state* terdistribusi adalah struktur lokal dalam artian setiap agen lokal (*nodes*) bertukar estimasi lokal melalui komunikasi lokal (Jayaprakash, Davidson, & Subha Hency Jose, Comparison of controller performance for MIMO process, 2008). Akan tetapi, menemukan struktur lokal memiliki kesulitan tersendiri (L, S, & S, 2005). Juga, estimasi terdistribusi tidak dapat mengestimasi *state* sistem hanya dengan menggunakan pengukuran lokal (Han, Trentelman, Wang, & Shen, 2018). Pentingnya interaksi antar estimasi lokal bertujuan untuk membuat konvergensi dalam proses estimasi. Dalam tugas akhir ini, *quadruple-tank process* merupakan sistem multivariabel yang digunakan. *Quadruple-tank process* adalah proses skala lab yang didesain untuk menggambarkan batas-batas performansi karena *zero location* pada sistem kontrol multivariabel. *Quadruple-*

tank process terdiri dari tangki air yang saling terhubung dan dua pompa (Henrik, The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero, 2000). Dimana tujuan dari sistem pengendalian pada quadruple-tank process adalah menjaga volume dari tangki guna menjalankan performanya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini ialah:

- a) Bagaimana cara merancang algoritma estimasi observer di quadruple-tank process?
- b) Bagaimana performansi hasil perancangan dengan sistem terdistribusi di quadruple-tank process?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah

- a) Mampu merancang algoritma estimasi observer di quadruple-tank process.
- b) Mampu menerapkan hasil perancangan dengan sistem terdistribusi di quadruple-tank process dengan performansi baik dimana error kurang dari 0,1% .

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari tugas akhir ini ialah

- a) Plant quadruple-tank process yang digunakan dalam skala lab.
- b) Plant quadruple-tank process memerlukan 200 sensor dan lebih dari 1000 koneksi.
- c) Topologi sensor yang dirancang dianggap sirkuler.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a) **BAB I PENDAHULUAN** Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.
- b) **BAB II TINJAUAN PUSTAKA** Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti *quadruple-tank process*, *observer*, dan sistem terdistribusi.
- c) **BAB III METODOLOGI PENELITIAN** Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam melakukan penelitian.
- d) **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN** Pada bab IV ini berisi tentang analisis dan pembahasan hasil perancangan estimasi terdistribusi dengan *observer*.
- e) **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN** Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan analisis data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

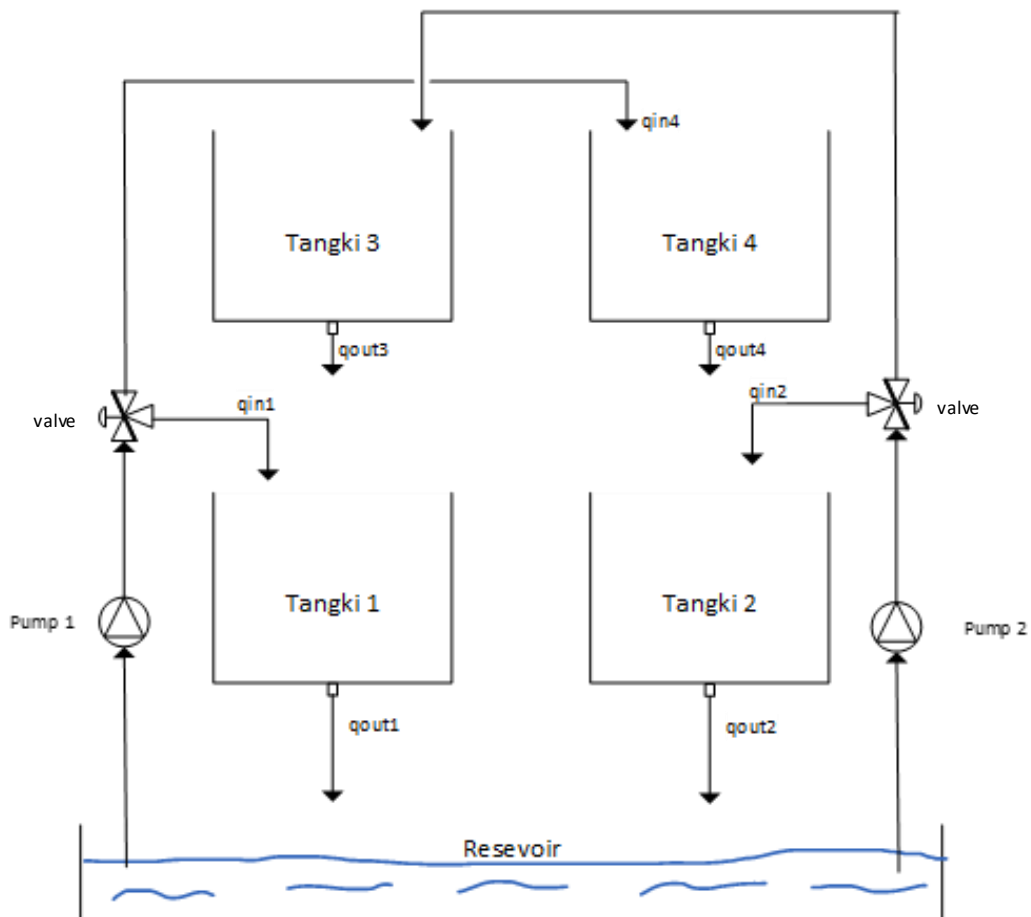
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Quadruple-tank Process*

Quadruple-tank process (QTP) merupakan proses laboratorium yang diusulkan oleh Karl Henrik Johansson dan José Luís Rocha Nunes (Henrik, *Relay Feedback and Multivariable Control*, 1997). Dalam *paper* tersebut, *quadruple-tank process* adalah proses laboratorium baru yang terdiri dari empat tangki air yang saling berhubungan dan dua pompa seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Quadruple-tank Process

Masukkan dari QTP adalah tegangan untuk dua pompa dan keluarannya adalah level air di dua tangki bawah. Proses pada QTP ini ada pada interkoneksi sederhana dari dua proses double-tank, yang merupakan proses standar di banyak

laboratorium kontrol (Henrik, Relay Feedback and Multivariable Control, 1997). Proses tersebut menampilkan fenomena multivariabel yang menarik.

2.1.1 Permodelan

Permodelan proses dari QTP digunakan untuk mengetahui perilaku perubahan-perubahan yang terjadi pada proses. Representasi berikut biasa digunakan dalam bentuk persamaan matematis dimana solusi persamaan tersebut menampilkan representasi perilaku dari process (Jayaprakash, Davidson, & Subha Hency Jose, Comparison of controller performance for MIMO process, 2008). Permodelan matematis yang dilakukan memerhatikan persamaan *mass balance* dan hukum Bernoulli:

$$\left. \begin{array}{l} \{Rate\ of\ Accumulation\} \\ \{of\ Mass\ in\ System\} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \{Mass\ flow\ rate\} \\ \{into\ the\ System\} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \{Mass\ flow\ out\} \\ \{of\ the\ System\} \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Kemudian, menggunakan hukum konservasi massa

$$\frac{dm_T}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (2.2)$$

Dimana :

m_T : Massa akumulasi di tangki
 = *volume tangki (V) * densitas fluida di tangki (ρ)*

m_{in} : Rata-rata aliran massa masuk
 = *rata² aliran masuk (q_{in}) * densitas fluida masuk (ρ_1)*

m_{out} : Rata-rata aliran massa keluar
 = *rata² aliran masuk (q_{out}) * densitas fluida masuk (ρ_2)*

Persamaan 2.2 dapat diubah dalam persamaan non-linear dari *quadruple-tank process*

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = \rho \cdot q_{in} - \rho \cdot q_{out} \quad (2.3)$$

Pada sistem ini menggunakan jenis fluida yang sama ($\rho = \rho_1 = \rho_2$), maka

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = q_{in_i} - q_{out_i} \quad (2.4)$$

Dimana:

A_i : luas area penampang tangki

dh_i : level tangki

q_{in_i} dan q_{out_i} : aliran masuk dan aliran keluar dari tangka $i = 1 \dots 4$

Aliran masuk tangki dipengaruhi oleh masukkan dari pompa. Sementara, aliran keluar tangki didapatkan dengan persamaan Bernoulli dan *rate liquid*.

$$q_{in_1} = \gamma_1 \cdot k_1 \cdot V_1 \quad (2.5)$$

$$q_{in_2} = \gamma_2 \cdot k_2 \cdot V_2 \quad (2.6)$$

$$q_{in_3} = k_2 \cdot V_2 (1 - \gamma_2) \quad (2.7)$$

$$q_{in_3} = k_1 \cdot V_1 (1 - \gamma_1) \quad (2.8)$$

Dimana :

k_1, k_2 : konstanta pompa

V_1, V_2 : kecepatan aliran melalui pompa

γ_1, γ_2 : rasio valve

Maka, persamaan aliran masuk dan keluar tangki ialah:

$$q_{out_i} = a_i \sqrt{2gh_i} \quad (2.9)$$

Dimana :

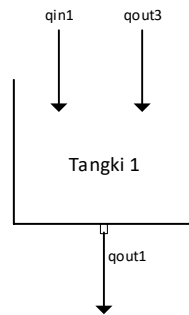
a_i : luas area pipa keluaran tangki

g : percepatan gravitasi

h_i : level air pada masing-masing tangki

Lalu, dari penjabaran persamaan-persamaan yang terjadi di tangki, kita dapat mengamati pada masing-masing tangki sebagai berikut :

Pada tangki 1



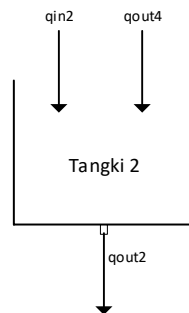
Gambar 2.2 Kestimbangan Massa di Tangki 1

Hukum konservasi massa

$$[\text{Rate of accumulation}] = [\text{Rate of in-flow}] - [\text{Rate of out-flow}]$$

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= q_{in_1} + q_{out_3} - q_{out_1} \\ &= (\gamma_1 \cdot k_1 \cdot V_1) + a_3 \sqrt{2gh_3} - a_1 \sqrt{2gh_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Pada tangki 2



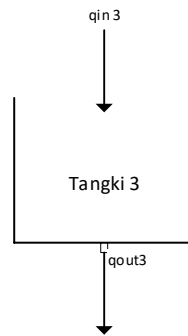
Gambar 2.3 Kestimbangan Massa di Tangki 2

Hukum konservasi massa

$$[\text{Rate of accumulation}] = [\text{Rate of in-flow}] - [\text{Rate of out-flow}]$$

$$\begin{aligned} A_2 \frac{dh_2}{dt} &= q_{in_2} + q_{out_4} - q_{out_2} \\ &= (\gamma_2 \cdot k_2 \cdot V_2) + a_4 \sqrt{2gh_4} - a_2 \sqrt{2gh_2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pada tangki 3



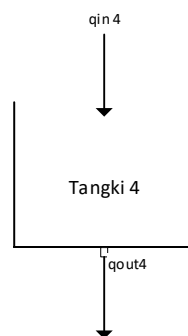
Gambar 2.4 Kestimbangan Massa di Tangki 3

Hukum konservasi massa

$$[\text{Rate of accumulation}] = [\text{Rate of in-flow}] - [\text{Rate of out-flow}]$$

$$\begin{aligned} A_3 \frac{dh_3}{dt} &= q_{in_3} - q_{out_3} \\ &= k_2 \cdot V_2 (1 - Y_2) - a_3 \sqrt{2gh_3} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Pada tangki 4



Gambar 2.5 Kestimbangan Massa di Tangki 4

Hukum konservasi massa

$$[\text{Rate of accumulation}] = [\text{Rate of in-flow}] - [\text{Rate of out-flow}]$$

$$\begin{aligned} A_4 \frac{dh_4}{dt} &= q_{in_4} - q_{out_4} \\ &= k_1 \cdot V_1 (1 - Y_1) - a_4 \sqrt{2gh_4} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Gambar 2.2 s.d. gambar 2.5 menunjukkan dinamika fluida yang terdapat pada *quadruple-tank process*. Guna memahami state dalam *quadruple-tank process*, maka dari dinamika fluida tangki-tangki yang ada diperlukan permodelan yang

merepresentasikan ketinggian fluida pada tangka-tangki di *quadruple-tank process*. Sehingga, dari persamaan 2.10 s.d. 2.13 didapat dirumuskan dalam bentuk permodelan matematisnya adalah sebagai berikut pada masing-masing tangki :

$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1}v_1 \\
 \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_3}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2}v_2 \\
 \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3}v_2 \\
 \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4}v_1
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Dari persamaan diferensial non-linear di atas, memiliki beberapa kesulitan untuk sistem kontrol sebab non-linear dan *uncertainty* (J, T, & T, 2014). Oleh karena itu, dari persamaan 2.14 linearisasi dengan deret Taylor dan transformasi matriks jacobian. Maka didapatkan persamaan dalam bentuk *state space* sebagai berikut :

$$\hat{x} = Ax + Bu \tag{2.15}$$

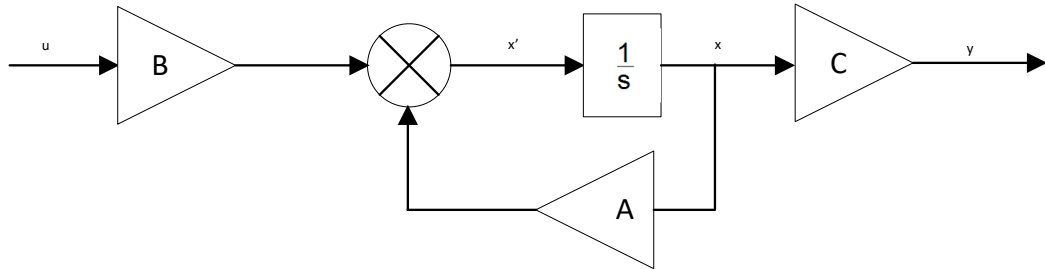
$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_1 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_2} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_1} & 0 \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$C = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

Gambar 2.6 merupakan bentuk diagram blok dari persamaan *state space*.



Gambar 2.6 Diagram blok *Quadruple-tank Process*

2.1.2 Fungsi Transfer

Fungsi transfer membantu dalam mempelajari dari domain frekuensi dan stabilitas dari suatu plant. Pada perumusan fungsi transfer pada *quadruple-tank process* digunakan persamaan 2.15 s.d. 2.17 dimana didapatkan matriks fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{C_1\gamma_1}{(1+sT_1)} & \frac{C_1(1-\gamma_2)}{(1+sT_1)(1+sT_3)} \\ C_2(1-\gamma_2) & \frac{C_2\gamma_2}{(1+sT_2)} \\ \frac{C_2(1-\gamma_2)}{(1+sT_2)(1+sT_4)} & \frac{C_2\gamma_2}{(1+sT_2)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Dimana

$$C_1 = \frac{T_1 k_c k_1}{A_1} ; C_2 = \frac{T_2 k_c k_2}{A_2}$$

2.2 Observer

Observer merupakan algoritma yang menggabungkan *sensed signals* dengan pengetahuan sistem control guna menghasilkan *observed signals*. *Observed signals* dapat menjadi lebih akurat, lebih murah untuk dibuat, dan lebih diandalkan daripada *sensed signals*. Prinsip dari *observer* adalah dengan menggabungkan sinyal *feedback* yang diukur dengan pengetahuan dari komponen sistem control (terutama dari *plant* dan *system feedback*), sifat dari *plant* dapat diketahui dengan presisi yang lebih baik dengan menggunakan sinyal *feedback* sendiri. *Observer* dapat digunakan untuk *meningkatkan* performa sistem. *Observer* menambah kompleksitas dari sistem dan membutuhkan sumber komputasi. *Observer* mungkin kurang baik dibanding sensor fisik dalam kekuatannya, terutama jika parameter *plant* berubah substansial selama operasi. Namun, *observer* tetap digunakan dengan keahlian

dapat memberi keuntungan performansi dan observer dapat membantu mengurangi biaya atau meningkatkan keandalan. Observer Luenberger dapat dibilang bentuk observer paling praktikal. Berikut merupakan persamaan umum dari observer dari (Ogata, 2009)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K_e \cdot e \\ y &= C\hat{x}\end{aligned}\tag{2.20}$$

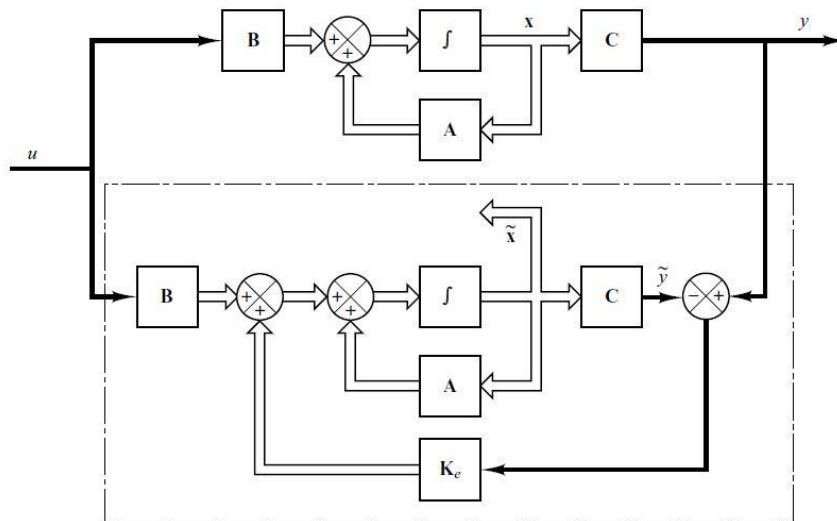
Dimana

\hat{x} merupakan state observer, $A \in R^{m \times m}$, $B \in R^{m \times n}$, serta $C \in R^{n \times m}$

e = error estimasi

$K_e = L$ = gain observer

Observer mengkoreksi estimasi dengan *feedback* dari error estimasi. Error estimasi yang akan digunakan sebagai *feedback* untuk mengoreksi sistem agar model sistem mendekati dengan nilai yang diinginkan. Berikut ilustrasi diagram blok *observer*

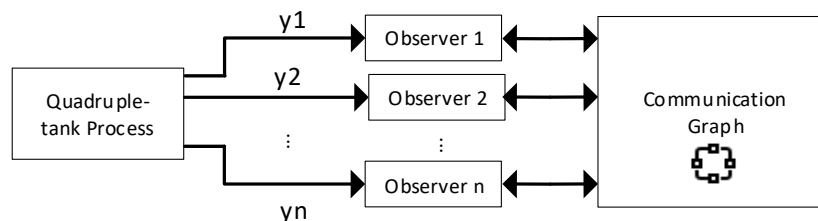


Gambar 2.7 Ilustrasi blok observer (Ogata, 2009)

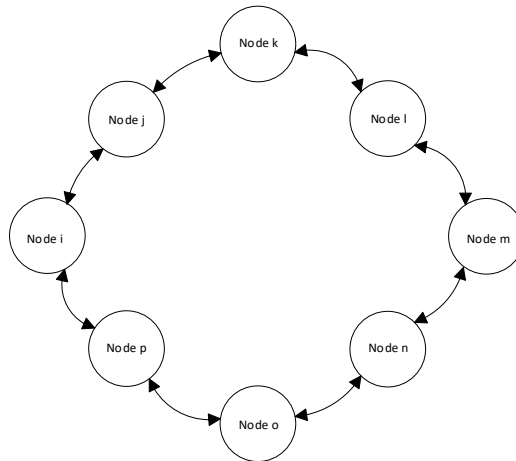
Pada gambar 2.7 terdapat dua bagian utama, yaitu sistem (terdiri dari Blok A, Blok B, Blok C, dan Blok Integrator) dan observer (terdiri dari Blok A, Blok B, Blok C, Blok K_e , dan Blok Integrator). Dalam mengetahui gain observer (K_e), kali ini menggunakan metode yang diperkenalkan oleh Luenberger.

2.3 Estimasi State Terdistribusi

Sejumlah penelitian sebelumnya sudah melakukan studi terkait estimasi state yang tidak dilakukan secara terpusat atau *centralized* tetapi dengan estimasi terdistribusi. Seperti dalam (Kim, Shim, & Cho, 2016), hal penting yang perlu diperhatikan dalam estimasi terdistribusi adalah mengetahui struktur lokal dari masing-masing estimator dimana setiap estimator akan bertukar estimasi lokal satu dengan yang lainnya dalam komunikasi estimator lokal tersebut. Juga, disebutkan dalam menemukan struktur lokal estimator mempunyai tantangan. Akan tetapi, terdapat beberapa keunggulan diantara lain fleksibilitas dan *robustness* dari estimasi *state* terdistribusi yang didapat. Maka, tujuan dari perancangan estimasi terdistribusi harus memenuhi syarat, yaitu (i) masing-masing observer lokal hanya menggunakan pengukuran local dan (ii) masing-masing observer lokal mampu berkomunikasi dengan observer local yang bertetangga. Estimasi terdistribusi berfungsi untuk membuat sebuah sistem menyeluruh yang mampu mengestimasi *state plant* dari banyak estimator lokal terdistribusi. Dimana masing-masing estimator lokal mampu mengestimasi secara baik *state* di lokal dimana estimator itu berada. Estimator terdistribusi diharapkan mampu menghasilkan estimasi *state* yang baik dengan tidak membuat satu desain estimasi untuk keseluruhan estimator *plant* sebagaimana jika menggunakan satu estimator *state* saja atau *centralized estimator*. Dalam membuat jaringan sensor estimasi terdistribusi, mengikuti kerangka sebagai berikut :



Gambar 2.8 Kerangka Estimasi State Terdistribusi



Gambar 2.9 Topologi Sensor pada *Communication Graph*

Observer lokal pada node I

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}_i + Bu + L_i(y_i - H_i\hat{x}_i) + \gamma M_i \sum_{j=i}^N a_{ij}(\hat{x}_j - \hat{x}_i), \quad i \in N \quad (2.22)$$

Dimana:

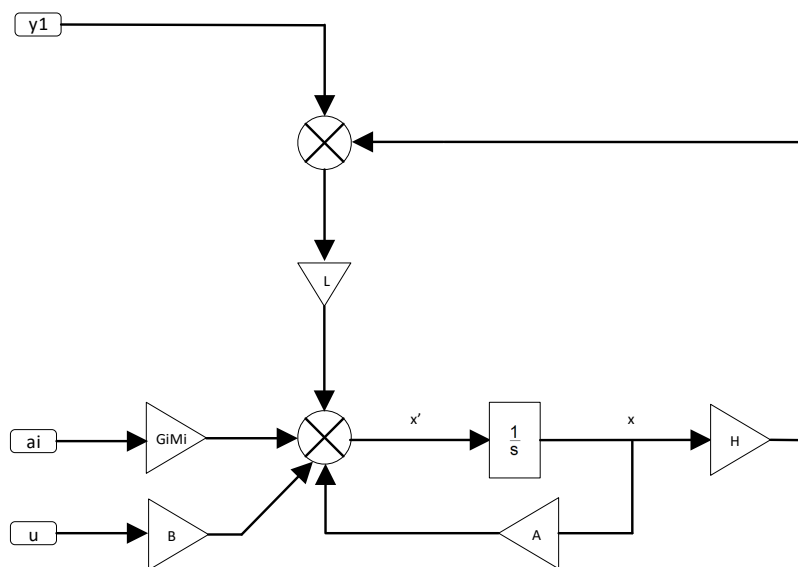
\hat{x}_i : state dari observer lokal

γ : *coupling gain*

L_i, M_i : matriks gain desain

a_{ij} : urutan (i,j) entry dari jaringan sensor

Dari persamaan 2.22, maka didapatkan diagram blok seperti pada gambar 3.10



Gambar 2.10 Diagram Blok Lokal Observer

Dari persamaan 2.22, terdapat parameter-parameter khusus yang hanya ada pada estimasi terdistribusi. Berikut masing-masing parameter tersebut

$$T_i^T A T_i = \begin{bmatrix} A_{io} & 0 \\ A_{ir} & A_{iu} \end{bmatrix}; H_i T_i = [H_{io} \quad 0] \quad (2.24)$$

$$L_i := T_i \begin{bmatrix} L_{id} \\ 0 \end{bmatrix}; M_i K_i := T_i \begin{bmatrix} K_i M_{id} & 0 \\ 0 & I_{vi} \end{bmatrix} T_i^T \quad (2.25)$$

Dimana :

L_i : *coupling gain*

k_i : *weighting gain*

I_{vi} : matriks identitas dari vi (dimensi dari *subspace* yang tidak terdeteksi)

T_i : matriks transform koordinat orthonormal

H_i, A : tidak selalu *observable* atau tidak terdeteksi

$H_{io}, A_{io}, A_{ir}, A_{iu}$: dimensi dari *unobservable sub-space* dari pasangan H_i, A

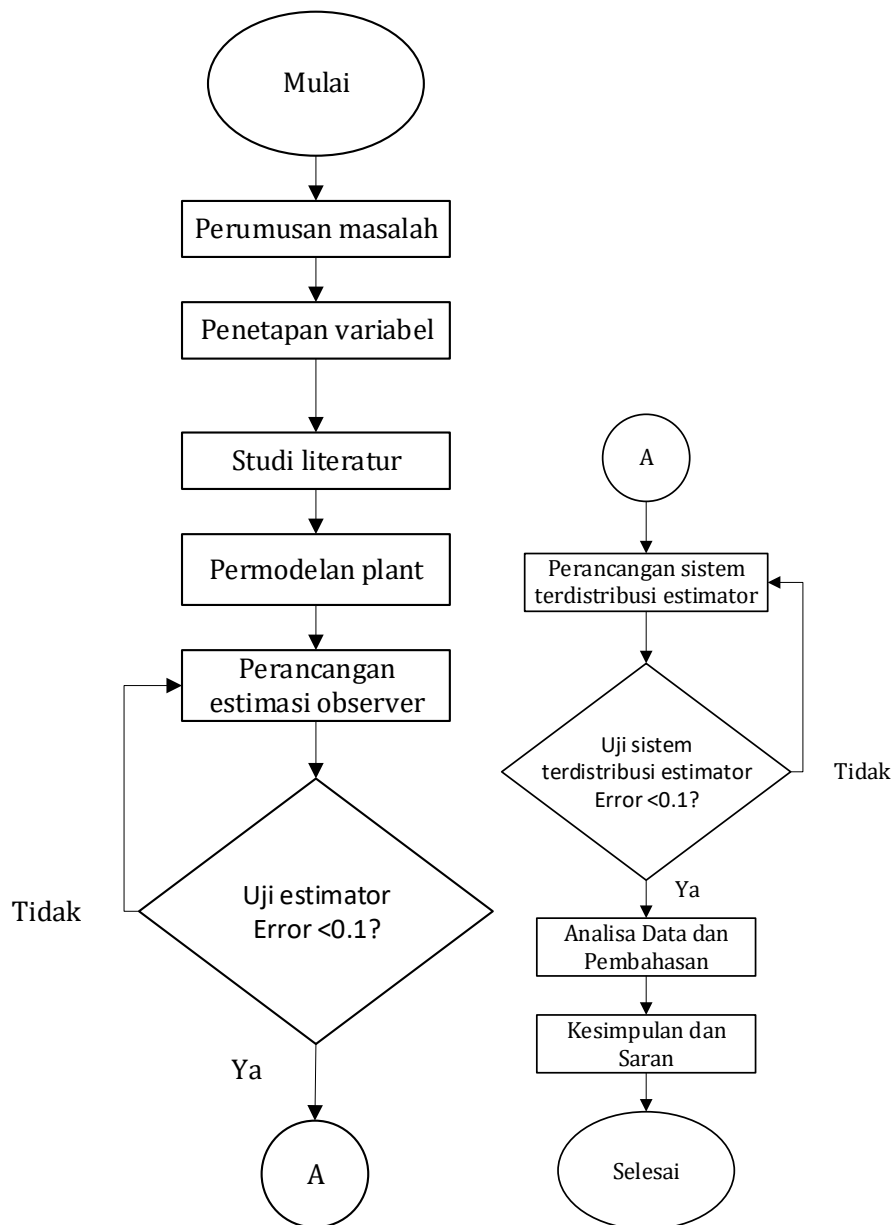
Gambar 2.8 merupakan kerangka dari estimasi terdistribusi. Dari sistem (dalam kasus ini adalah *quadruple-tank process*) akan diestimasi oleh sejumlah observer. Jumlah observer yang mengestimasi dipengaruhi oleh jumlah keluaran sistem. Pada estimasi terdistribusi ini, tiap lokal observer akan mengestimasi state dari *quadruple-tank process*. Setiap lokal (observer 1, observer 2, ..., observer n) akan menghasilkan hasil estimasi state berdasarkan persamaan 2.22 dan dalam blok di gambar 2.10. Setelah masing-masing lokal observer mampu mengestimasi state, hasil estimasi state akan masuk ke *communication graph*. Pada *communication graph*, antar hasil estimasi state akan mendapatkan hasil selisih estimasi state satu dengan yang lainnya. Misal, hasil selisih $\hat{x}_j - \hat{x}_i$ merupakan hasil komunikasi untuk node i nantinya. Lalu, a_{ij} merupakan matriks yang berfungsi mengatur komunikasi satu lokal observer dengan lokal observer yang akan berkomunikasi. Matriks a_{ij} berisi parameter bernilai 1 untuk lokal observer yang akan berkomunikasi. Sementara, bernilai 0 untuk lokal yang tidak akan berkomunikasi. Komunikasi node pada *communication graph* tidak dapat berkomunikasi dengan seluruh node. Seperti pada gambar 2.9, node hanya dapat berkomunikasi dengan *neighborhood*

nodes atau node yang berada di sebelahnya, contoh : pada node *i* hanya dapat berkomunikasi dengan node *j* dan node *p* saja. Dalam persamaan 2.22 terdapat input *u*, dimana *u* merupakan keluaran dari controller PI.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi literatur

Secara keseluruhan metode penelitian Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada tugas akhir ini diawali dengan perumusan masalah, penetapan variable, dan studi literatur terkait dengan topik penelitian meliputi prinsip *quadruple-tank process*, permodelan *quadruple-tank process*, observer yang digunakan, dan sistem terdistribusi. Kemudian, dari permodelan *quadruple-tank process* dilanjutkan pada perancangan estimasi observer. Observer yang digunakan adalah *Luenberger Observer*. Observer digunakan untuk mendapatkan estimasi *state* dari *quadruple-tank process*. Setelah perancangan estimasi observer selesai dilanjutkan dengan pengujian perancangan estimasi observer tersebut. Pengujian dilakukan dengan mengamati *state* dari *quadruple-tank process* dimana ketinggian level dari masing-masing tangki. Dari pengujian tersebut apabila error estimasi sama atau dibawah batas error estimasi yang ditetapkan maka dapat dilanjutkan ke sistem terdistribusi estimator. Sama seperti sebelumnya, pengujian sistem terdistribusi dari estimator dilakukan dengan mengamati *state* dari *quadruple-tank process* dimana ketinggian level dari masing-masing tangki. Dari pengujian tersebut apabila error estimasi sama atau dibawah batas error estimasi yang ditetapkan maka dapat dilanjutkan ke analisa data dan pembahasan. Terakhir, dari hasil analisa data dan pembahasan didapatkan kesimpulan dan saran.

3.2 Permodelan Quadruple-tank Process

Permodelan *quadruple-tank process* kali ini menggunakan permodelan *state space*. Permodelan *state space* sebagaimana yang ada pada persamaan 2.15 sampai dengan persamaan 2.17 dari masing-masing konstanta (A,B, dan C) memiliki parameter-parameter yang berbeda. Menggunakan parameter-parameter yang tercantum di (Gharaee & Shoorehdeli, An Observer Based Fault Detection and Isolation in Quadruple-tank Process, 2015; Jayaprakash, Davidson, & Subha Hency Jose, 2008), berikut nilai dari parameter tersebut.

Tabel 3.1 Tabel parameter Quadruple-tank Process

Parameter	Satuan	Nilai
$A_1; A_2; A_3; A_4$	cm^2	28;32;28;32
$a_1; a_2; a_3; a_4$	cm^2	0,071;0,057;0,071;0,057
$h_1; h_2; h_3; h_4$	cm	12,4;12,7;1,8;1,4
$v_1; v_2$	V	3;3
$k_1; k_2$	cm^2/vs	3,33;3,25
$\gamma_1; \gamma_2$		0,7;0,6
kc	v/cm	0,5
g	cm/s^2	981

Sehingga, sistem pada *quadruple-tank process*

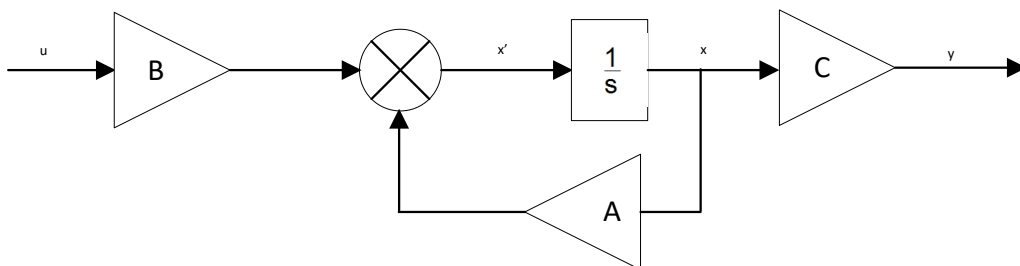
$$A = \begin{bmatrix} -0.016 & 0 & 0.027 & 0 \\ 0 & -0.011 & 0 & 0.018 \\ 0 & 0 & -0.027 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.018 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.025 & 0 \\ 0 & 0.063 \\ 0 & 0.048 \\ 0.031 & 0 \end{bmatrix}$$

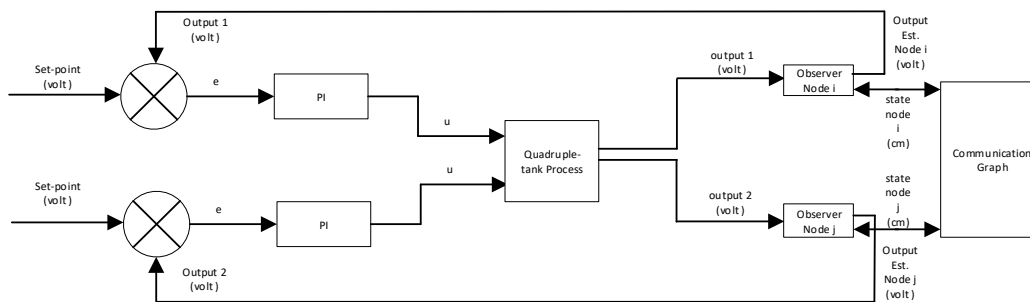
$$C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk fungsi transfer sebagai berikut:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.6}{(1+62s)} & \frac{1.5}{(1+23s)(1+62s)} \\ \frac{2.5}{(1+30s)(1+90s)} & \frac{1.6}{(1+90s)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

**Gambar 3.2** Diagram Blok dari *Quadruple-tank Process*

Sistem kontrol dari *quadruple-tank process* ialah sistem kontrol multi input dan multi output (MIMO). Berdasarkan (Jayaprakash, Davidson, & Subha Hency Jose, 2008), sistem kontrol *decentralized* digunakan dalam sistem kontrol pada *quadruple-tank process*. Kontroller dibuat dengan u_i terdiri dari sinyal terukur y_i dan *set point* r_j seperti pada gambar 3.2. Lalu, pada gambar 3.3 adalah diagram blok *plant* dengan estimator terdistribusi.



Gambar 3.3 Diagram Blok *Plant*

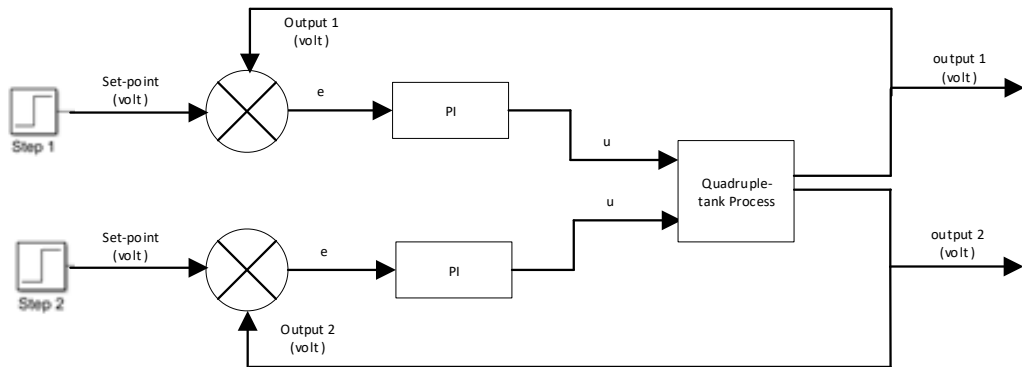
Decentralized controller selalu menghasilkan jumlah masukan dan jumlah keluaran yang sama. Jika jumlah masukan dengan jumlah keluaran tidak sama, maka sejumlah sinyal tidak digunakan. Pada *quadruple-tank process*, sistem fasa minimum dapat dikontrol dengan kontroller PI. Sistem fasa minimum adalah saat aliran fluida lebih besar menuju tangki yang lebih rendah dibanding tangki yang lebih tinggi. Dalam penentuan apakah sistem fasa minimum atau non-minimum adalah dari rasio valve. Nilai rasio valve untuk sistem fasa minimum adalah $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$. Sementara, nilai rasio valve untuk sistem fasa non-minimum adalah $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$. Penggunaan *decentralized controller* pada *quadruple-tank process* ditunjukkan pada gambar 3.4. Bentuk kontroller PI ialah

$$C_l(s) = k_{pl} + \left(\frac{k_{il}}{s} \right); l = 1,2 \quad (3.3)$$

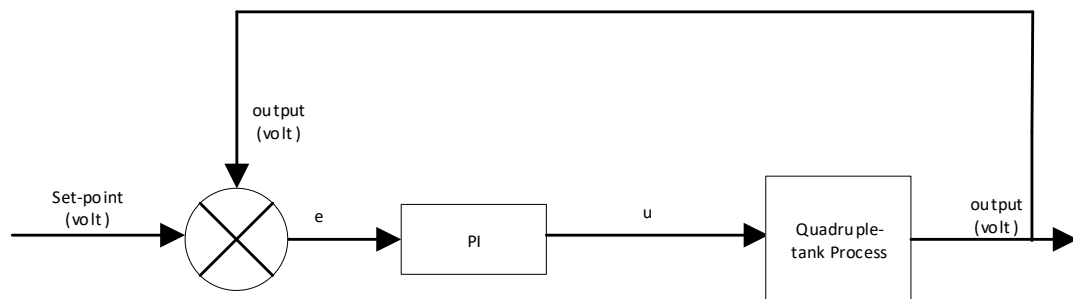
Dimana :

k_{pl} : gain proporsional dari kontroller l

k_{il} : gain integral dari controller l



Gambar 3.4 Diagram Blok dari *Quadruple-tank Process* dengan controller PI Terdesentralisasi

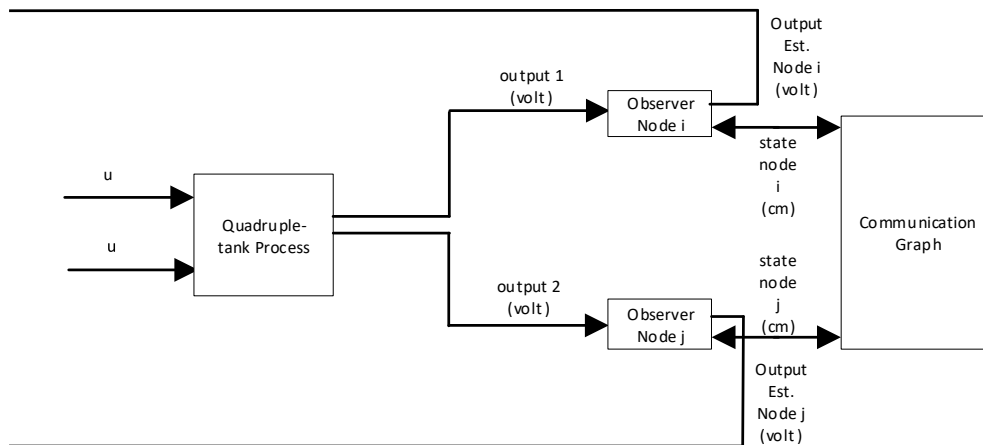


Gambar 3.5 Diagram Blok dari *Quadruple-tank Process* dengan Controller PI Tersentralisasi

Juga, *quadruple-tank process* diuji juga dengan *centralized controller* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Dimana *centralized controller* hanya menggunakan satu masukan dan satu keluaran.

3.3 Perancangan Estimasi Terdistribusi dengan Observer

Pada perancangan pada *quadruple-tank process* digunakan desain observer terdistribusi dengan jumlah sensor node dua. Berikut diagram blok estimasi terdistribusi observer:



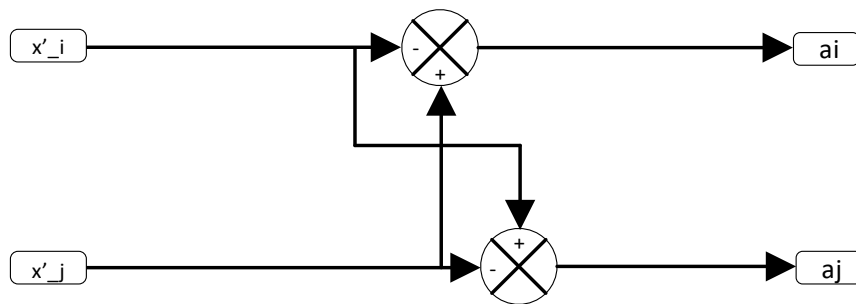
Gambar 3.6 Diagram Blok Estimasi Terdistribusi

Dari gambar 3.6, dapat diperhatikan bahwa keluaran1 dari *Quadruple-tank Process* merupakan output dari plant. Dimana menunjukkan state level pada tangki satu dan dua yang merupakan tujuan sistem kontrol. Kemudian, pada estimasi terdistribusi terdapat kumpulan node-node.

Tabel 3.2 Tabel parameter lokal observer

Parameter	Nilai
$T_1 = T_2$	$[\text{eye}(2) \text{ zeros}(2);$ $\text{zeros}(2) \text{ eye}(2)];$
L_{1d}	$[3; 1];$
L_{2d}	$[-1; 3];$
L_1	$T1*[L1d; \text{zeros}(2,1)];$
L_2	$T2*[L2d; \text{zeros}(2,1)];$
M_{1d}	$[0.005 \ -0.005;$ $0.005 \ 0.1];$
M_{2d}	$[0.0286 \ -0.025;$ $-0.025 \ 0.0387];$
γ	6
K_1	3
K_2	4.5
H_1	$[1 \ 0 \ 0 \ 0];$
H_2	$[0 \ 1 \ 0 \ 0];$

Masing-masing node terdapat estimator, dalam hal ini adalah lokal observer. Dimana diagram blok dari lokal observer sesuai dengan gambar 2.10 merupakan diagram blok dari persamaan 2.22. Parameter-parameter yang digunakan pada diagram blok lokal observer pada masing-masing node terdapat pada tabel 3.2. Rancangan *communication graph* pada kasus ini cukup sederhana. Hasil komunikasi antar lokal observer hanya merupakan selisih dengan satu lokal observer lain. Dalam kasus ini, hasil komunikasi lokal observer node i merupakan $\hat{x}_j - \hat{x}_i$. Sementara, hasil komunikasi lokal observer node j merupakan $\hat{x}_i - \hat{x}_j$. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.7 di bawah.



Gambar 3.7 *Communication Graph* dari Node i dan j

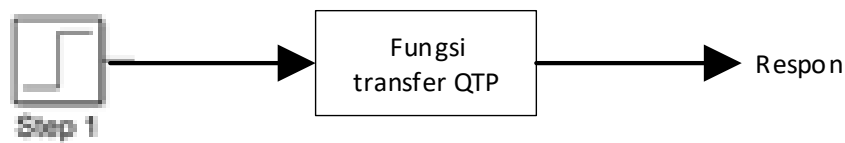
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

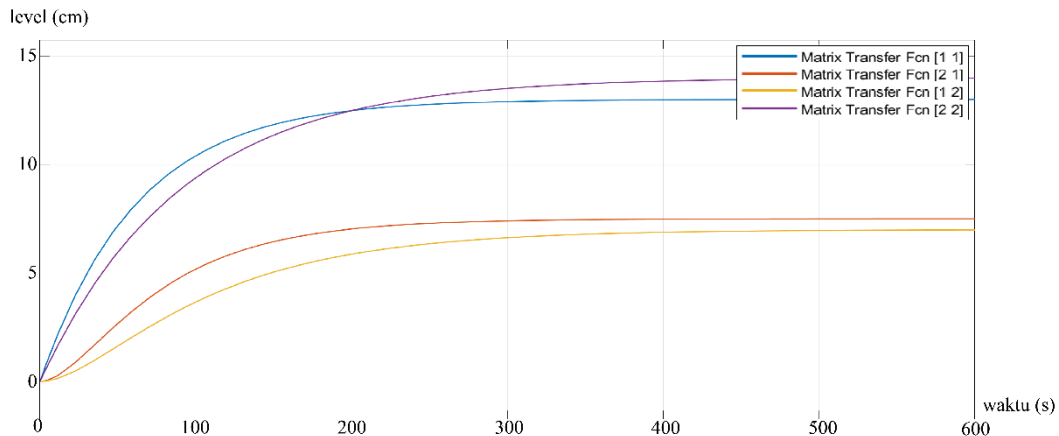
4.1 Hasil Uji Perancangan dengan *Quadruple-tank Process Open Loop*

Uji open loop ini bertujuan untuk mengetahui respon dari plant, ketika belum menggunakan pengendali. Dari respon tersebut akan dilihat apakah proses memerlukan controller atau tidak untuk menjamin agar proses dapat berjalan dengan aman. Penyusunan simulink dilakukan seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Blok Uji *Open Loop*

Pada sinyal masukan diberikan nilai *set point* 5 cm. Lalu, pada fungsi transfer berisi permodelan matematis *quadruple-tank process*. Hasil respon ditunjukkan oleh gambar 4.2.



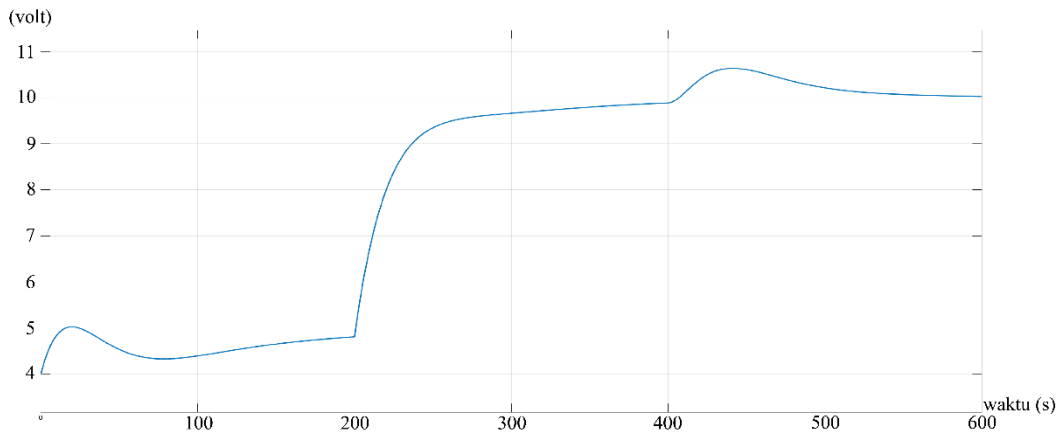
Gambar 4.2 Respon Uji *Plant Open Loop*

Dari gambar 4.2 didapatkan respon uji *open loop* bahwa respon pada *plant* melebihi *set point* yang diinginkan, yaitu 5 cm. Sehingga, *plant* memerlukan controller agar respon *plant* yang diinginkan dapat sesuai dengan *set point*.

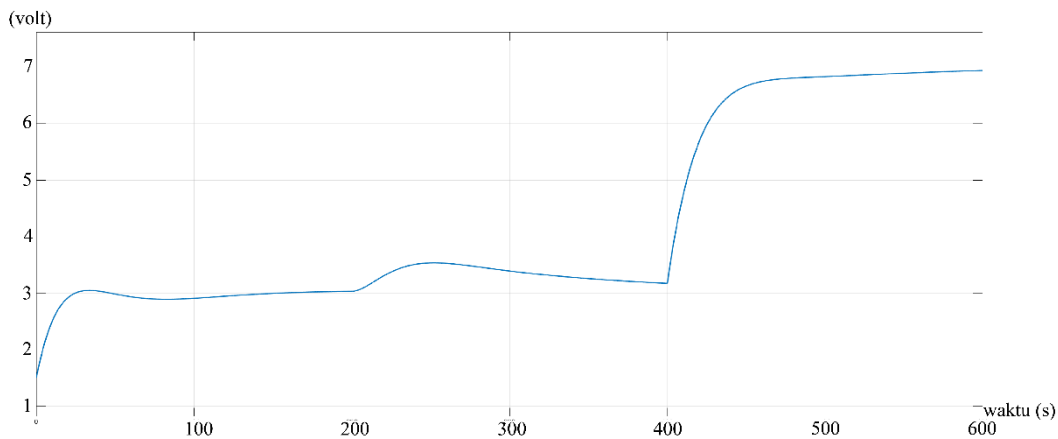
4.2 Hasil Uji Perancangan dengan *Quadruple-tank Process Closed Loop*

Uji perancangan dilakukan dengan controller PI, parameter pada model dari gambar 3.4 berdasarkan persamaan *state space* pada persamaan 3.1. Parameter yang

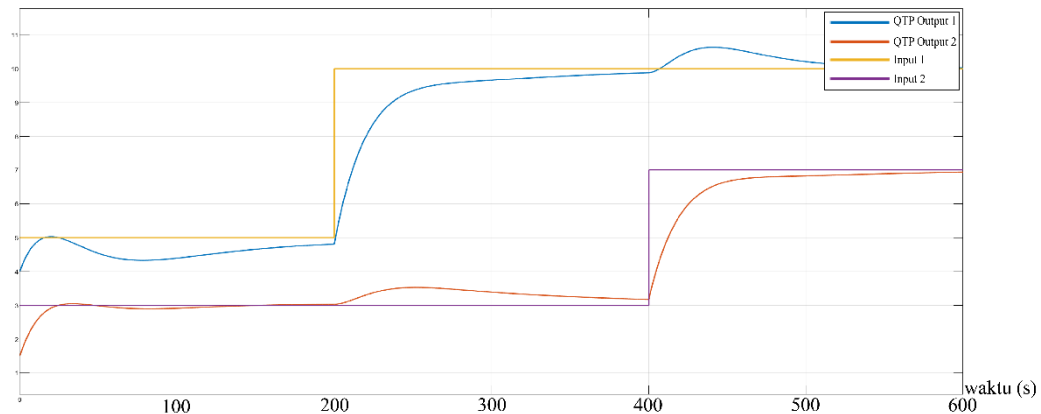
digunakan dalam controller ialah untuk controller PI 1 nilai $k_p = 1.19$ dan $k_i = 0.0192$. Sementara, untuk controller PI 2 nilai nilai $k_p = 1.607$ dan $k_i = 0.017$. Kemudian, sebagai set point pada diagram Simulink digunakan fungsi step 1 pada controller 1 dengan inisiasi tegangan awal 5 volt dan setelah 200 s berubah menjadi 10 volt. Sementara, untuk fungsi step 2 pada controller PI 2 dengan inisiasi tegangan awal 3 volt dan setelah 400 s berubah menjadi 7 volt.



Gambar 4.3 Respon I dari Controller PI Terdesentralisasi



Gambar 4.4 Respon II dari dari Controller PI Terdesentralisasi



Gambar 4.5 Respon I dan II dengan Fungsi Step I dan II dari Kontroler PI Desentralisasi

Respon I dari *quadruple-tank process* oleh kontroler I dan respon II dari *quadruple-tank process* oleh kontroler II dapat diamati dari gambar 4.3 dan gambar 4.4 menunjukkan bahwa *decentralized PI Controller* mampu melakukan *tracking* dari set point (fungsi step) seperti pada gambar 4.5.

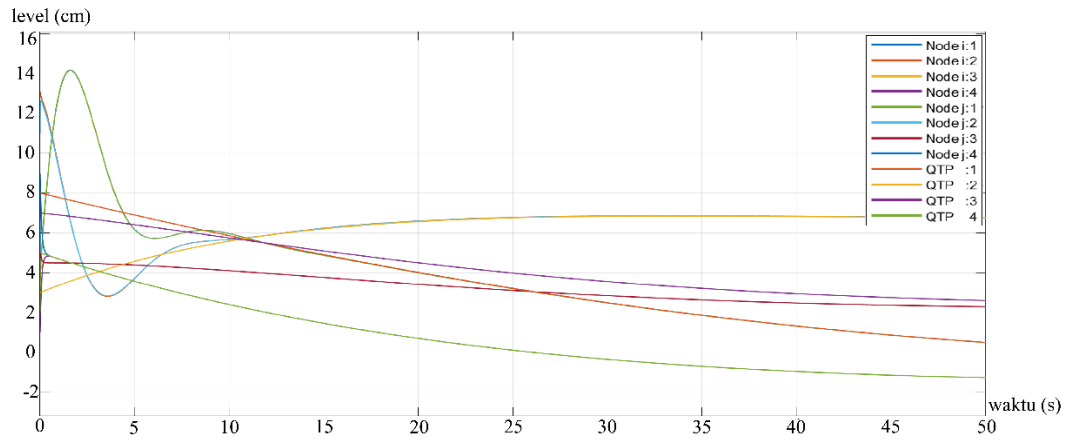
4.3 Hasil Uji Perancangan dengan Kontroler PI Desentralisasi

Simulasi dilakukan pada *software* Matlab R2019a, fungsi input menggunakan fungsi step. Uji dilakukan tiga kali uji sesuai pada tabel 4.1 sebagai berikut:

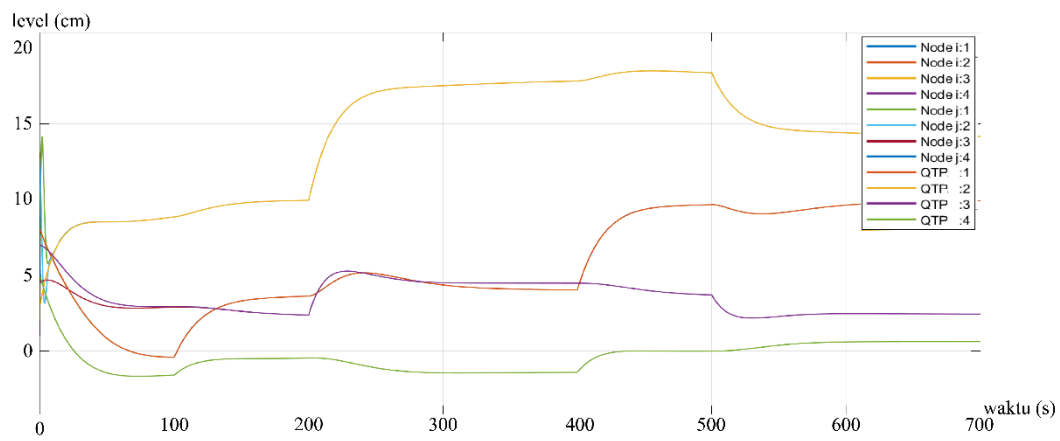
Tabel 4.1 Input Fungsi Step untuk Kontroler PI Desentralisasi

No	Keterangan	Input I		Input II	
1	Inisiasi (V)	0	0	4	0
	Waktu Step (s)	100	400	200	500
	Final (V)	2	3	8	-1
2	Inisiasi (V)	3	0	1	1
	Waktu Step (s)	200	500	300	750
	Final (V)	7	1	6	-1
3	Inisiasi (V)	1	2	1	0
	Waktu Step (s)	50	250	150	500
	Final (V)	5	-2	3	-3

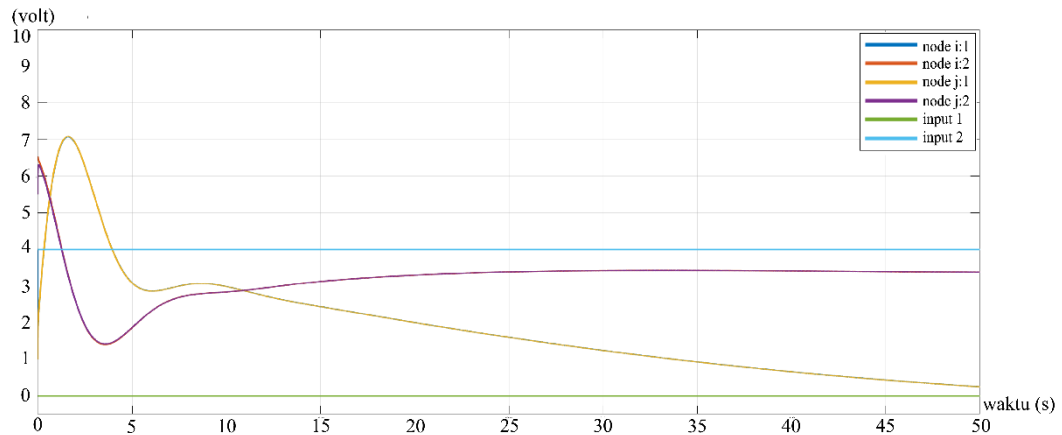
Berdasarkan tabel 4.1 dilakukan simulasi, sehingga didapatkan respon sebagai berikut:



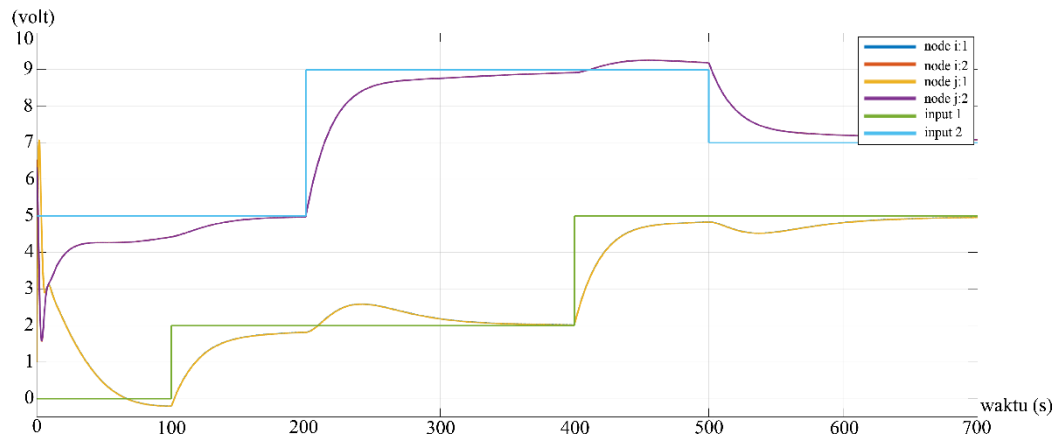
Gambar 4.6 Respon State Uji No.1 Durasi 50 Sekon



Gambar 4.7 Respon State Uji No.1 Durasi 700 sekon



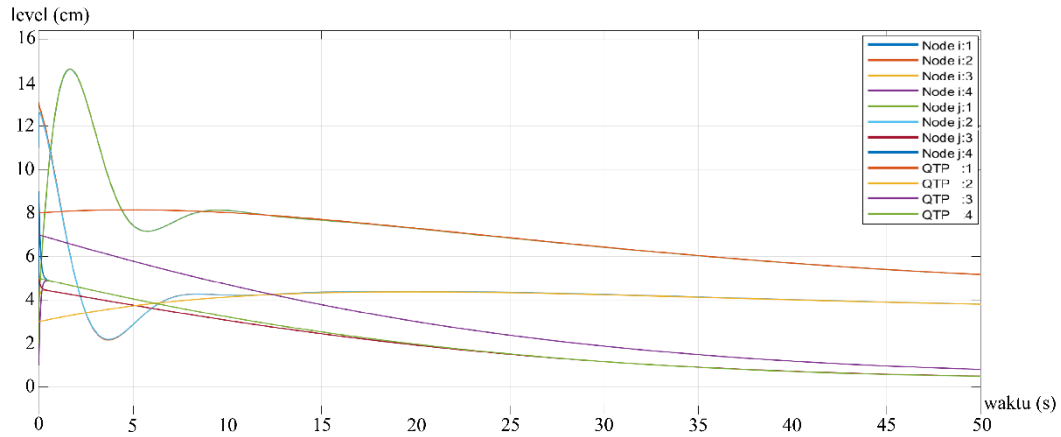
Gambar 4.8 Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 50 sekon



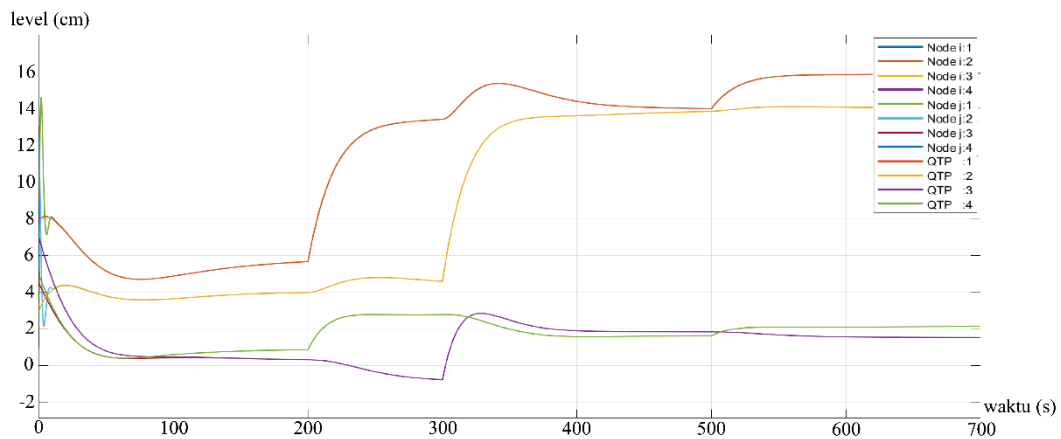
Gambar 4.9 Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 600 sekon

Berdasarkan gambar 4.6 s.d. gambar 4.17 didapatkan hasil respon sesuai *set-point* pada tabel 4.1. Dari gambar 4.6 s.d. gambar 4.9 merupakan hasil respon saat diberikan input I dan input II. Input I dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 100 detik akan berakhir di nilai 2 dan kedua dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 400 detik akan berakhir di nilai 3. Input II dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 4, dengan waktu fungsi step setelah 200 detik akan berakhir di nilai 8 dan kedua dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 500 detik akan berakhir di nilai -1. Dari gambar 4.6 dan gambar 4.7 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.8

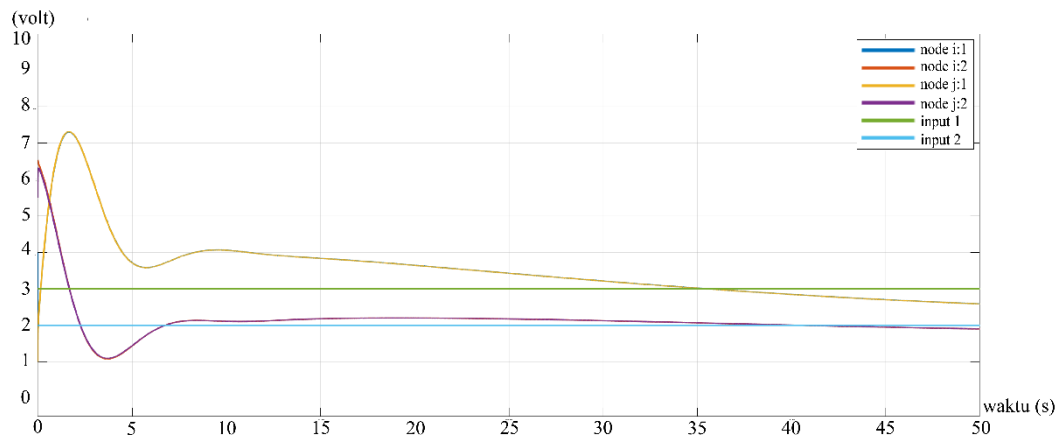
dan gambar 4.7. dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j.



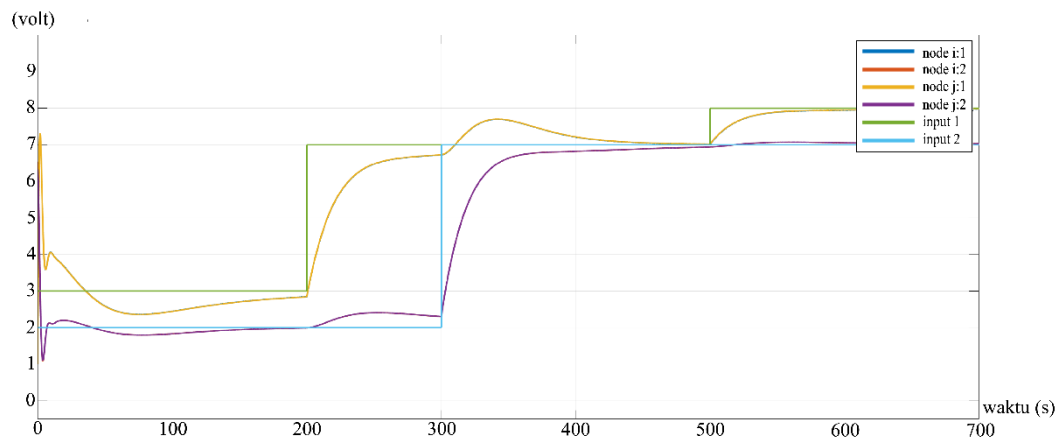
Gambar 4.10 Respon State Uji No.2 Durasi 50 sekon



Gambar 4.11 Respon State Uji No.2 Durasi 600 sekon



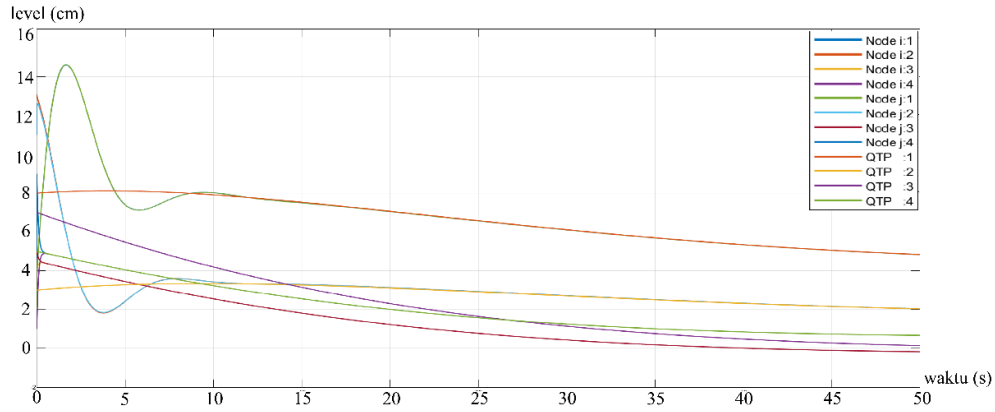
Gambar 4.12 Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 50 Sekon



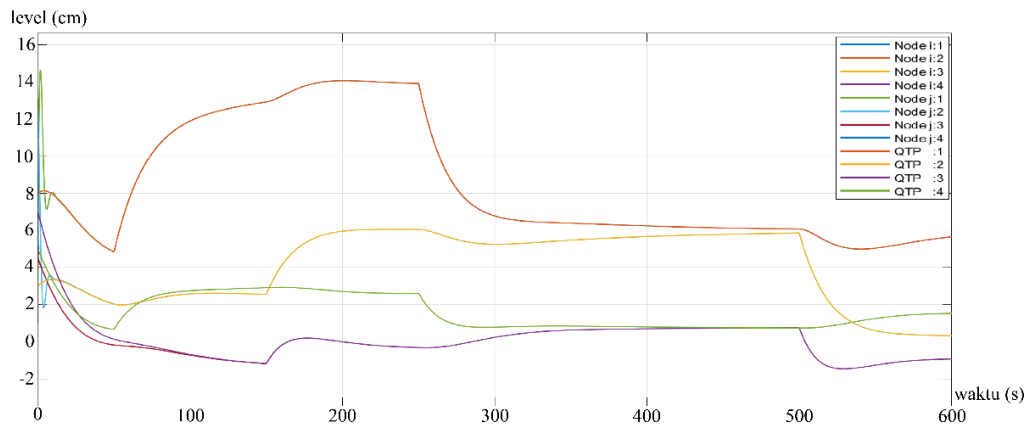
Gambar 4.13 Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 700 sekon

Dari gambar 4.10 dan gambar 4.13 merupakan hasil respon saat diberikan input I dan input II. Input I dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 3, dengan waktu fungsi step setelah 200 detik akan berakhir di nilai 7 dan kedua dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 500 detik akan berakhir di nilai 1. Input II dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 1, dengan waktu fungsi step setelah 300 detik akan berakhir di nilai 6 dan kedua dengan inisiasi di nilai 1, dengan waktu fungsi step setelah 750 detik akan berakhir di nilai -1. Dari gambar 4.10 dan gambar 4.11 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.12 dan gambar 4.13 dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran

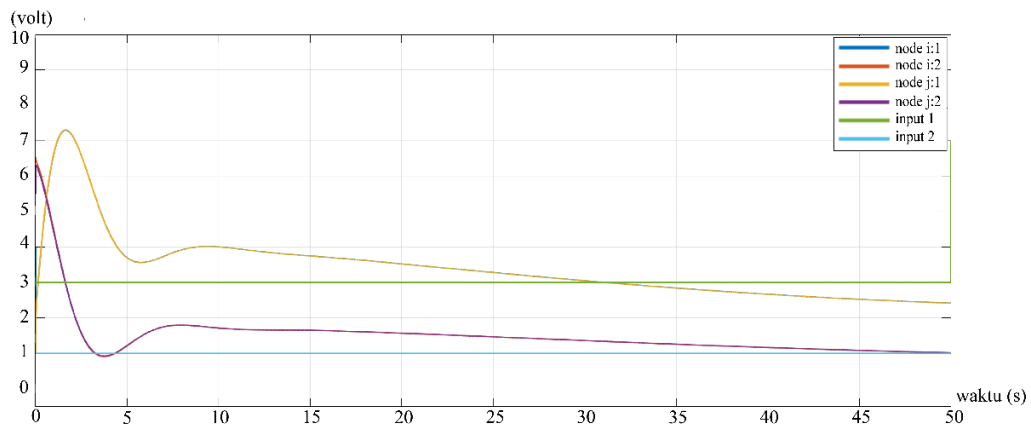
dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j.



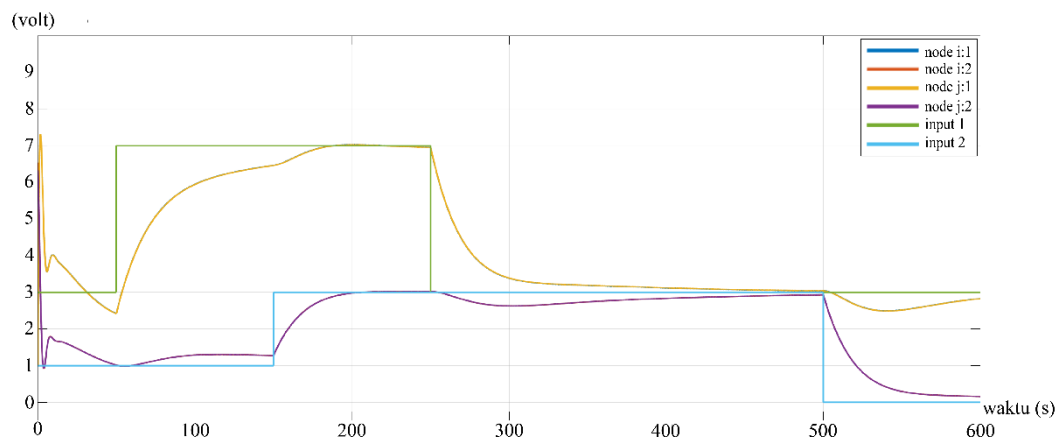
Gambar 4.14 Respon State Uji No.3 Durasi 50 detik



Gambar 4.15 Respon State Uji No.3 Durasi 600 detik



Gambar 4.16 Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 50 detik



Gambar 4.17 Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 600 sekon

Dari gambar 4.14 dan gambar 4.17 merupakan hasil respon saat diberikan input I dan input II Input I dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 1, dengan waktu fungsi step setelah 50 detik akan berakhir di nilai 5 dan kedua dengan inisiasi di nilai 2, dengan waktu fungsi step setelah 250 detik akan berakhir di nilai -2. Input II dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 1, dengan waktu fungsi step setelah 150 detik akan berakhir di nilai 3 dan kedua dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 500 detik akan berakhir di nilai -3. Dari gambar 4.14 dan gambar 4.15 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.16 dan gambar 4.17 dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j. Tujuan dilakukan tiga kali pengujian estimasi terdistribusi pada *quadruple-tank process* ialah mengamati apakah estimator mampu mengestimasi state *quadruple-tank process*. Berdasarkan hasil respon pada gambar 4.8, gambar 4.9, gambar 4.12, gambar 4.13, gambar 4.16, dan gambar 4.17 respon yang didapatkan adalah estimator dari node i dan node j mampu mengestimasi input fungsi step yang diberikan. Dari hasil estimasi yang dilakukan, didapatkan error dari uji perancangan dengan kontroler PI desentralisasi pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Error Uji Perancangan dengan kontroler PI Desentralisasi

Keterangan	ERROR X	ERROR Y
Set-point 1	0.060799	0.25913
Set-point 2	2.317858	4.915454
Set-point 3	0.213437	0.479231
Rata2 Error	0.764031	0.431143

Berdasarkan tabel 4.2 didapatkan error rata-rata dari hasil respon state ialah 0.764031 % dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.431143 %.

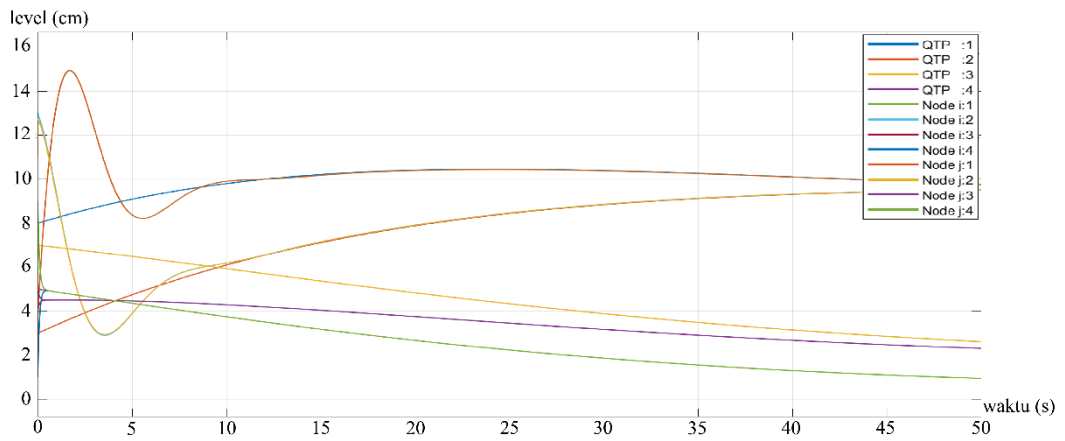
4.4 Hasil Uji Perancangan dengan Kontroler PI Tersentralisasi

Simulasi dilakukan pada *software* Matlab R2019a, fungsi input menggunakan fungsi step

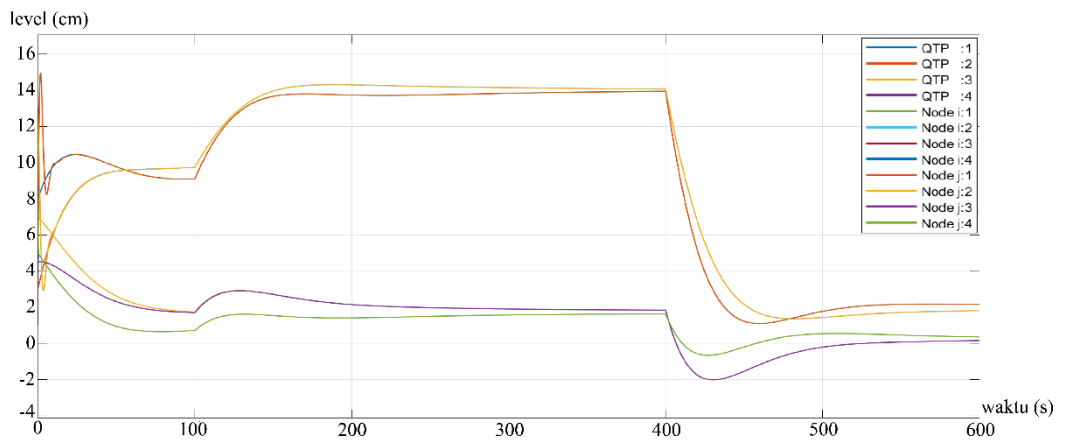
Tabel 4.3 Input Fungsi Step pada Kontroler PI Tersentralisasi

No	Keterangan	Input I	
1	Inisiasi (V)	3	2
	Waktu Step (s)	100	400
	Final (V)	5	-4
2	Inisiasi (V)	5	1
	Waktu Step (s)	250	700
	Final (V)	9	-6
3	Inisiasi (V)	2	0
	Waktu Step (s)	300	600
	Final (V)	6	-4

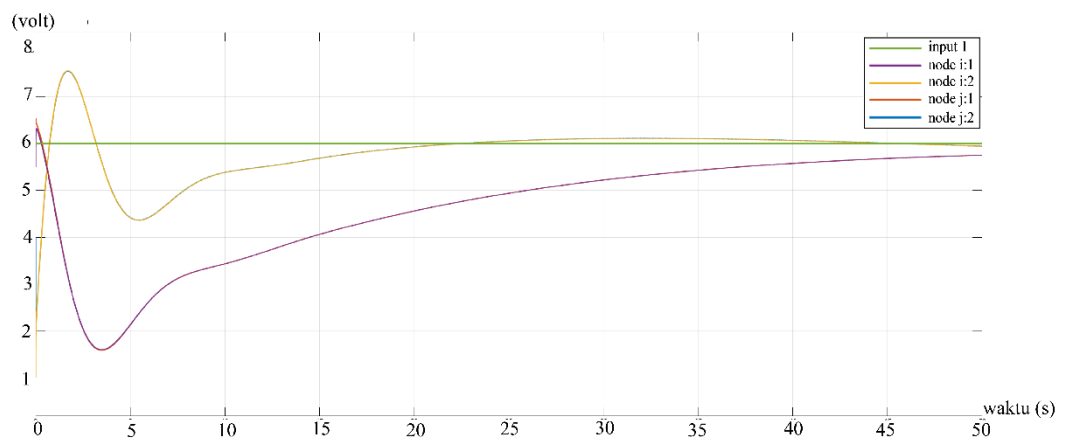
Berdasarkan tabel 4.1 dilakukan simulasi, sehingga didapatkan respon sebagai berikut:



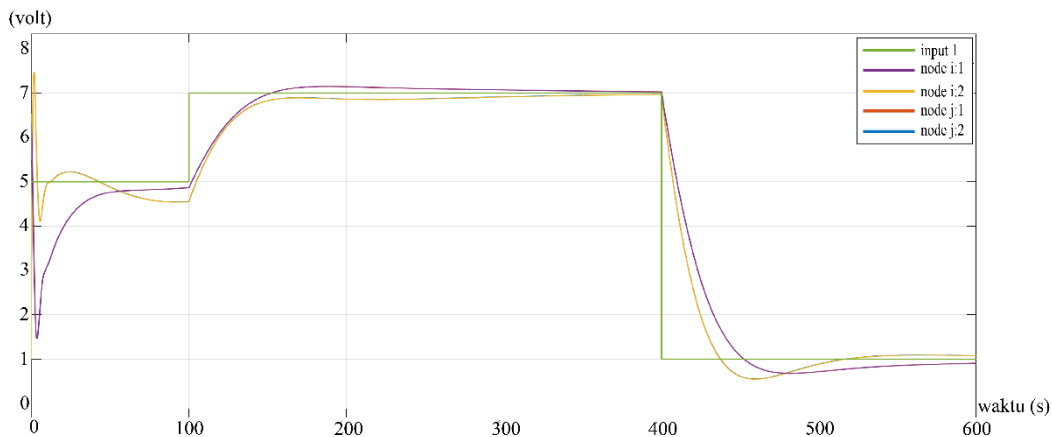
Gambar 4.18 Respon State Uji No.1 Durasi 50 sekon



Gambar 4.19 Respon State Uji No.1 Durasi 600 sekon

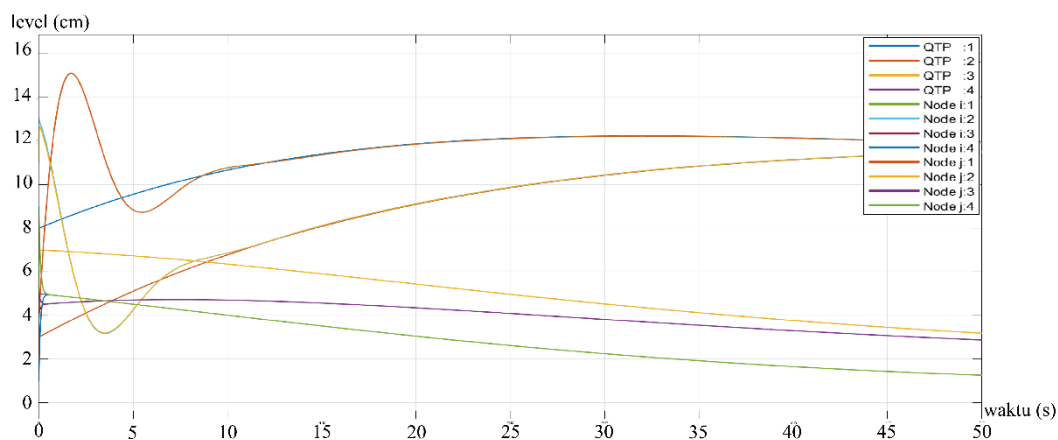


Gambar 4.20 Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 50 sekon

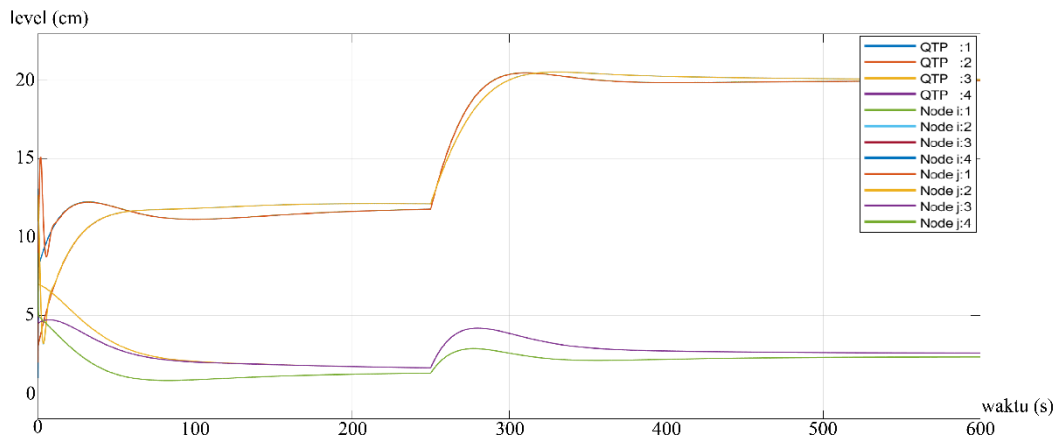


Gambar 4.21 Respon Keluaran Uji No.1 Durasi 600 sekon

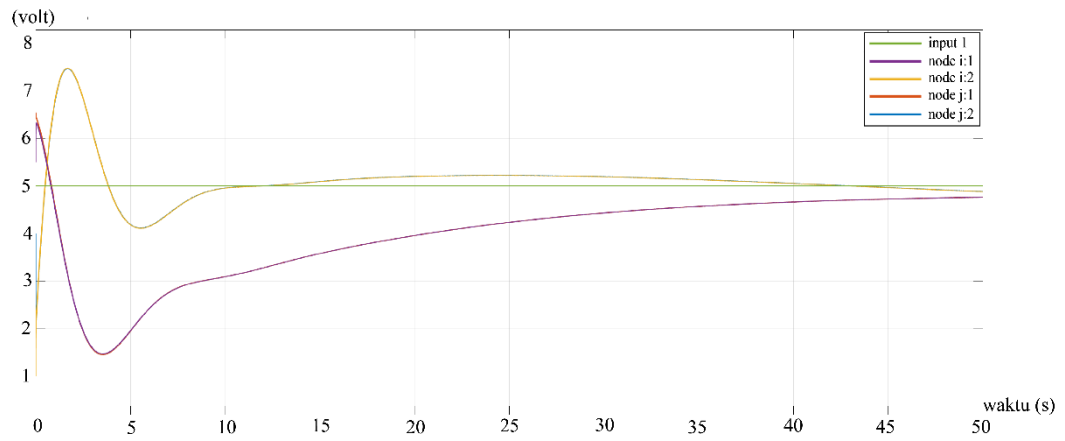
Berdasarkan gambar 4.18 s.d. gambar 4.29 didapatkan hasil respon sesuai *set-point* pada tabel 4.3. Dari gambar 4.18 dan gambar 4.21 merupakan hasil respon saat diberikan input. Input dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 3, dengan waktu fungsi step setelah 100 detik akan berakhir di nilai 5 dan kedua dengan inisiasi di nilai 2, dengan waktu fungsi step setelah 400 detik akan berakhir di nilai -4. Dari gambar 4.18 dan gambar 4.21 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.20 dan gambar 4.21 dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j.



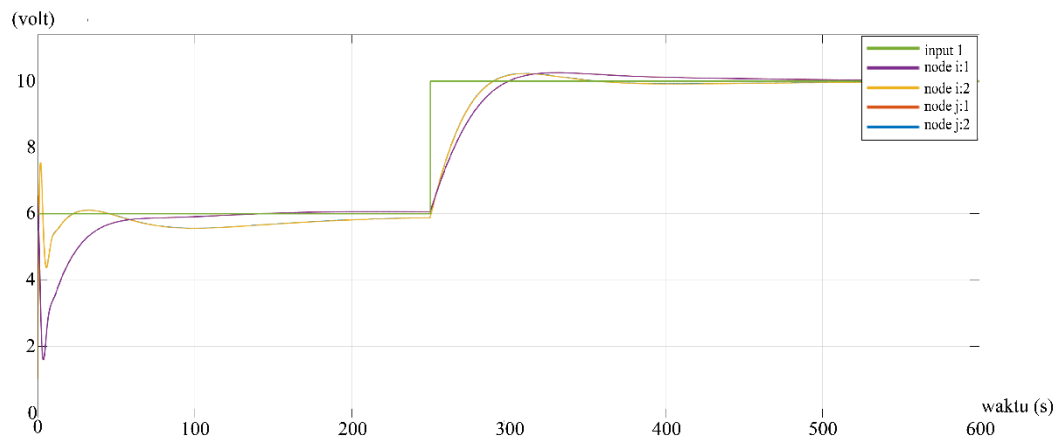
Gambar 4.22 Respon State Uji No.2 Durasi 50 sekon



Gambar 4.23 Respon State Uji No.2 Durasi 600 detik

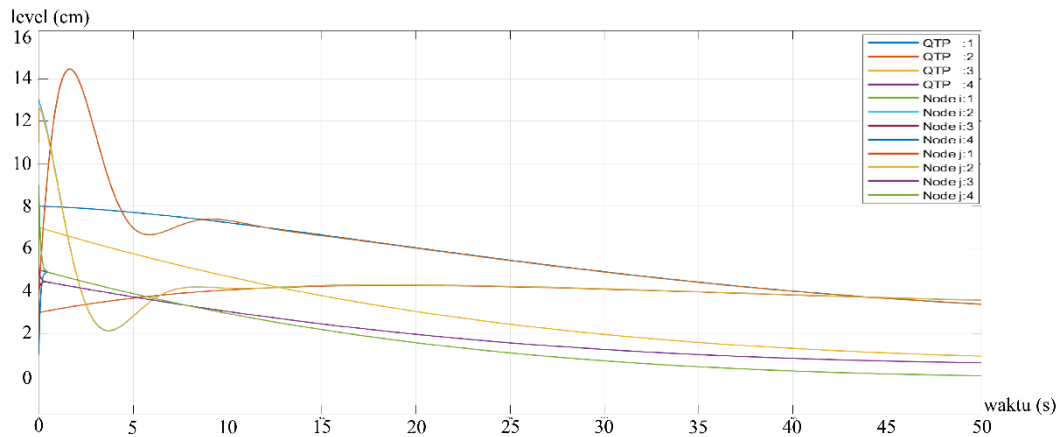


Gambar 4.24 Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 50 detik

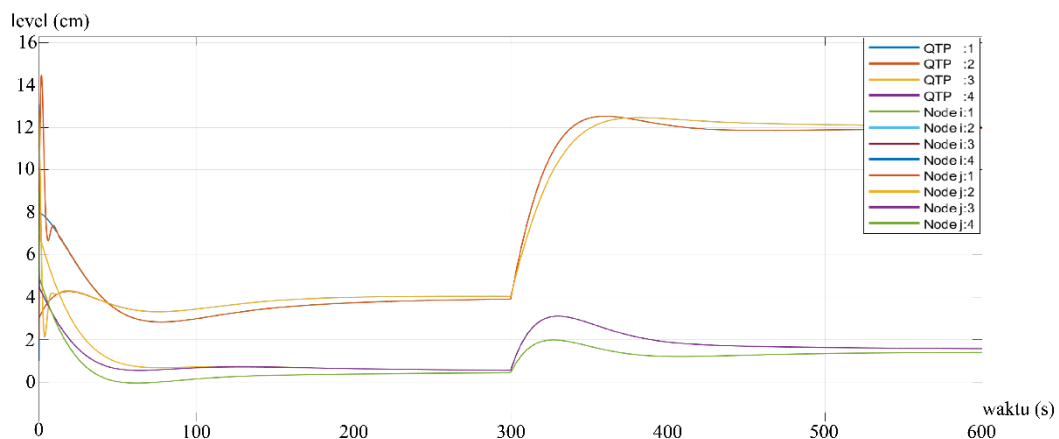


Gambar 4.25 Respon Keluaran Uji No.2 Durasi 600 detik

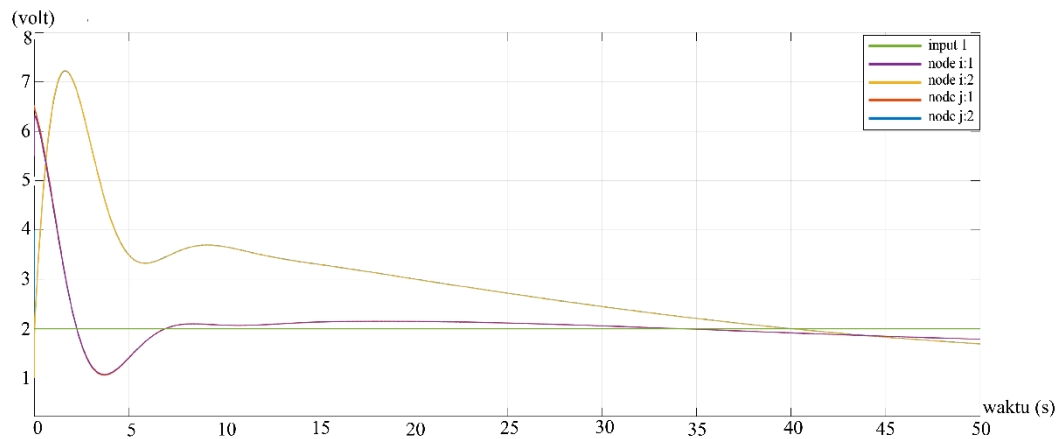
Dari gambar 4.22 dan gambar 4.25 merupakan hasil respon saat diberikan input. Input dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 5, dengan waktu fungsi step setelah 250 detik akan berakhir di nilai 9 dan kedua dengan inisiasi di nilai 1, dengan waktu fungsi step setelah 700 detik akan berakhir di nilai -6. Dari gambar 4.22 dan gambar 4.25 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.24 dan gambar 4.25 dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j.



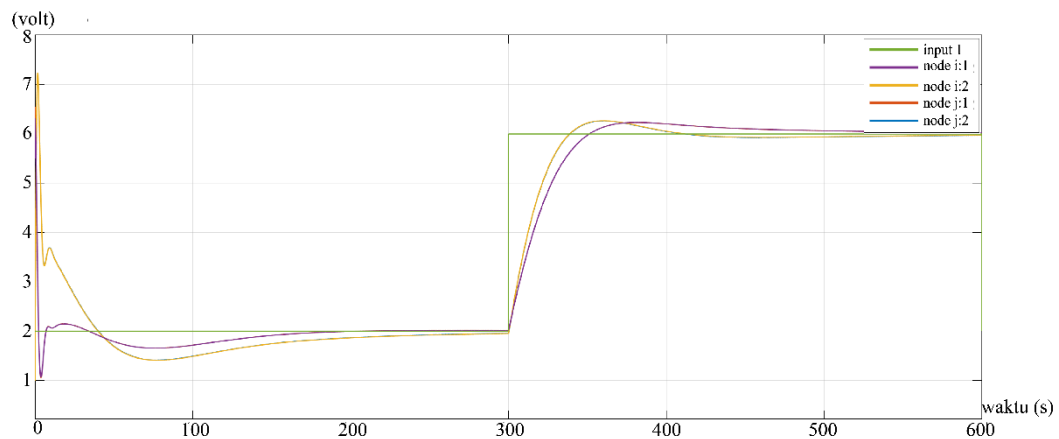
Gambar 4.26 Respon State Uji No.3 Durasi 50 sekon



Gambar 4.27 Respon State Uji No.3 Durasi 600 sekon



Gambar 4.28 Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 50 sekon



Gambar 4.29 Respon Keluaran Uji No.3 Durasi 600 sekon

Dari gambar 4.26 dan gambar 4.29 merupakan hasil respon saat diberikan input. Input dengan dua input fungsi step ialah pertama dengan inisiasi di nilai 2, dengan waktu fungsi step setelah 300 detik akan berakhir di nilai 6 dan kedua dengan inisiasi di nilai 0, dengan waktu fungsi step setelah 600 detik akan berakhir di nilai -4. Dari gambar 4.26 dan gambar 4.27 dapat diamati state atau ketinggian level. $X_1 \dots X_4$ adalah state true dari plant. $X_{1_i} \dots X_{4_i}$ adalah state true dari estimator i. $X_{1_j} \dots X_{4_j}$ adalah state true dari estimator j. Dari gambar 4.28 dan gambar 4.29 dapat diamati keluaran berupa tegangan. Y_1 dan Y_2 adalah keluaran dari plant. Y_{1_i} dan Y_{2_i} adalah keluaran dari plant dari estimator i. Y_{1_j} dan Y_{2_j} adalah keluaran dari plant dari estimator j. *quadruple-tank process*. Berdasarkan hasil respon pada gambar gambar 4.20, gambar 4.21, gambar 4.24, gambar 4.25, gambar 4.28, dan

gambar 4.29 respon yang didapatkan adalah estimator dari node i dan node j mampu mengestimasi input fungsi step yang diberikan. Dari hasil estimasi yang dilakukan, didapatkan error dari uji perancangan dengan kontroler PI desentralisasi pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Uji Perancangan dengan kontroler PI Tersentralisasi

Keterangan	ERROR X	ERROR Y
Set-point 1	6.814328	0.52009
Set-point 2	0	0.00136
Set-point 3	1.725774	0.388898
Rata2 Error	2.8467	0.303449

Berdasarkan tabel 4.4 didapatkan error rata-rata dari hasil respon state ialah 2.8467 % dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.303449 %.

4.5 Analisa dan Pembahasan

Berdasarkan dua hasil uji, hasil uji perancangan dengan kontroler PI desentralisasi dan hasil uji perancangan dengan kontroler PI tersentralisasi, estimator sudah dapat mengestimasi state, saat mengamati hasil respon antara state plant dengan estimator. Juga, saat mengamati set-point antara keluaran estimator dan set-point dan plot hasil estimator mampu konvergen setelah beberapa waktu. Hal ini ditunjukkan dari hasil awal 50 sekon dari masing-masing estimator mampu mendekati hasil dan state dari *quadruple-tank process*. Meskipun, jika diamati dari hasil error dari kedua hasil uji belum memenuhi tujuan tugas akhir ini, yaitu <0.1 %. Adapun perbaikan yang dapat dilakukan untuk pengujian kedepannya diantara lain merancang controller yang lebih baik, dari pemilihan maupun nilai-nilai pada controller. Juga, untuk perancangan estimator terdistribusi disarankan menambah jumlah node. Hal ini berpengaruh sebab pada komunikasi di persamaan 2.22 jumlah n pada $\sum_{j=i}^N a_{ij}(\hat{x}_j - \hat{x}_i)$ merupakan jumlah selisih antar state masing-masing node. Dengan memperbanyak jumlah node, error yang dihasilkan pun akan semakin berkurang. Adapun catatan dalam memperbanyak jumlah node pada plant ini, yaitu memerhatikan nilai RGA atau *Relative Gain Array*. Sebagaimana yang dijelaskan pada sumber acuan (Jayaprakash, Davidson, & Subha Hency Jose, Comparison of controller performance for MIMO process, 2008).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Hasil perancangan estimator terdistribusi dimana respon state dan keluarannya sudah cukup mampu dapat *tracking* sesuai *true state* untuk estimasi state estimator dan set-point untuk keluaran estimator.
- b. Hasil perancangan estimator masih belum mencapai error yang diinginkan sebesar $<0.1\%$. Dengan hasil uji dengan kontroler PI desentralisasi ialah error rata-rata dari hasil respon state ialah 0.764031% dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.431143% . Sementara, hasil uji dengan kontroler PI tersentralisasi ialah error rata-rata dari hasil respon state ialah 2.8467% dan error rata-rata dari hasil respon keluaran ialah 0.303449% .

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis berdasarkan hasil pengujian ialah sebagai berikut :

- a. Untuk pengujian kedepannya ialah merancang kontroller yang lebih baik, dari pemilihan maupun nilai-nilai pada kontroller.
- b. Untuk perancangan estimator terdistribusi disarankan menambah jumlah node. Hal ini berpengaruh sebab pada komunikasi di persamaan 2.22 jumlah n pada $\sum_{j=i}^N a_{ij}(\hat{x}_j - \hat{x}_i)$ merupakan jumlah selisih antar state masing-masing node. Dengan memperbanyak jumlah node, error yang dihasilkan pun akan semakin berkurang. Adapun catatan dalam memperbanyak jumlah node pada plant ini, yaitu memerhatikan nilai RGA atau *Relative Gain Array*. Sebagaimana yang dijelaskan pada sumber acuan (Jayaprakash, Davidson, & Subha, Comparison of Controller Performance for MIMO Process, 2008)

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Gharaee, Z., & Shoorehdeli, M. A. (2015). An observer based fault detection and isolation in quadruple tank process. *IEEE*, 2437-2441.
- Gharaee, Z., & Shoorehdeli, M. A. (2015). An Observer Based Fault Detection and Isolation in Quadruple-tank Process. *IEEE*, 2437-2441.
- Han, W., Trentelman, H. L., Wang, Z., & Shen, Y. (2018). A Simple Approach to Distributed Observer Design for Linear Systems. *IEEE CSS*, 329-336.
- Henrik, J. K. (1997). *Relay Feedback and Multivariable Control*. Lund: Lund Institute of Technology.
- Henrik, J. K. (2000). The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero. *IEEE*, 456-464.
- J, J., T, S., & T, H. B. (2014). Analysis of Modelling Methods of Quadruple Tank System. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics, and Instrumentation Engineering*, 11552-11565.
- Jayaprakash, J., Davidson, D., & Subha Hency Jose, P. (2008). Comparison of controller performance for MIMO process. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 51-59.
- Jayaprakash, J., Davidson, D., & Subha, H. J. (2008). Comparison of Controller Performance for MIMO Process. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 51-59.
- Kim, T., Shim, H., & Cho, D. D. (2016). Distributed Luenberger Observer Design. *IEEE*, 6928-6933.
- L, X., S, B., & S, L. (2005). A Scheme for Robust Distributed Sensor Fusion Based on Average Consensus. *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 63-70.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Saif, M., & Guan, Y. (1992). Decentralized State Estimation in Large-scale Interconnected Dynamical Systems. *Automatica*, 215-219.

Taekyoo, K., Hyungbo, S., & Dan, C. D. (2016). Distributed Luenberger Observer Design. *IEEE*, 6928-6933.

Westbrook, M. H. (2005). *Development and future of battery, hybrid, and fuel-cell cars*. London: The Institution of Electrical Engineers.

LAMPIRAN

A. Simulasi Matlab

```
Kodingan Matlab Quadruple-tank Process
clear all
clc
%Quadruple-tank Process Parameter
%Gamma (valve ratio )for non minimum-phase
gamma1 = 0.7;
gamma2 = 0.6;
A1 = 28;      A3 = A1;
A2 = 32;      A4 = A2;
a1 = 0.071;   a3 = a1;
a2 = 0.057;   a4 = a2;
g = 981;
h1 = 12.4;    h3 = 1.8;
h2 = 12.7;    h4 = 1.4;
k1 = 3.33;    k2 = 3.35;
kc = 0.5;
Tp1 = (A1/a1)*sqrt(2*h1/g);      Tp3 = (A3/a3)*sqrt(2*h3/g);
Tp2 = (A2/a2)*sqrt(2*h2/g);      Tp4 = (A4/a4)*sqrt(2*h4/g);

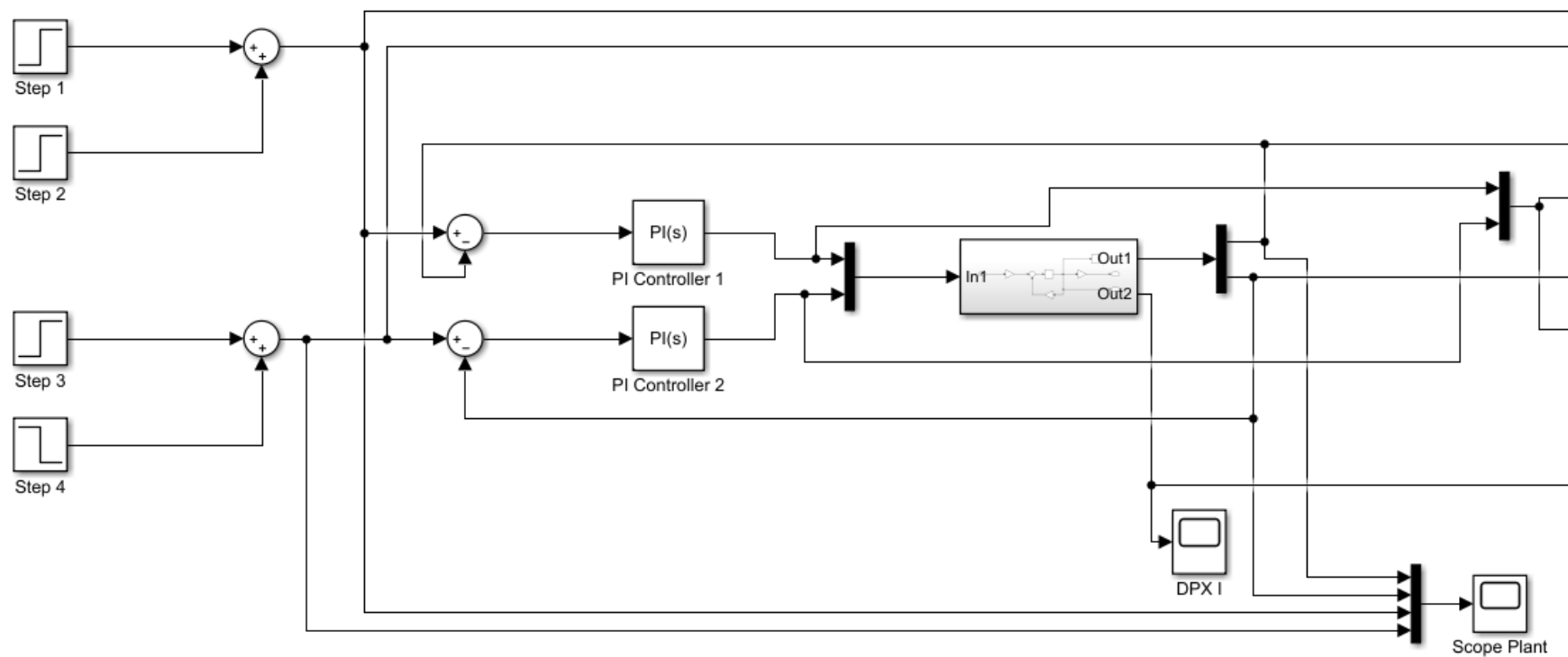
%state-space form
A = [-1/Tp1  0      A3/(A1*Tp3)  0;
      0      -1/Tp2  0          A4/(A2*Tp4);
      0      0      -1/Tp3     0;
      0      0      0          -1/Tp4];
B = [gamma1*k1/A1  0;
      0            gamma2*k2/A2;
      0            (1-gamma2)*k2/A3;
      (1-gamma1)*k1/A4  0];
N = 2;              % The number of sensors
H = [kc 0  0  0;
      0  kc 0  0];
H1 = eye(4)*0.5;

x01 = [8 13 4 1]'; x02 = [2 11 5 9]';
```

```
% Computing L(i)
T1 = [eye(2)    zeros(2);
      zeros(2) eye(2)];
T2 = T1;
L1d = [3; 1];  L2d = [-1; 3];
L1 = T1*[L1d; zeros(2,1)]; L2 = T2*[L2d; zeros(2,1)];
M1d = [0.005 -0.005;
       0.005  0.1];
M2d = [0.0286  -0.025;
       -0.025   0.0387];

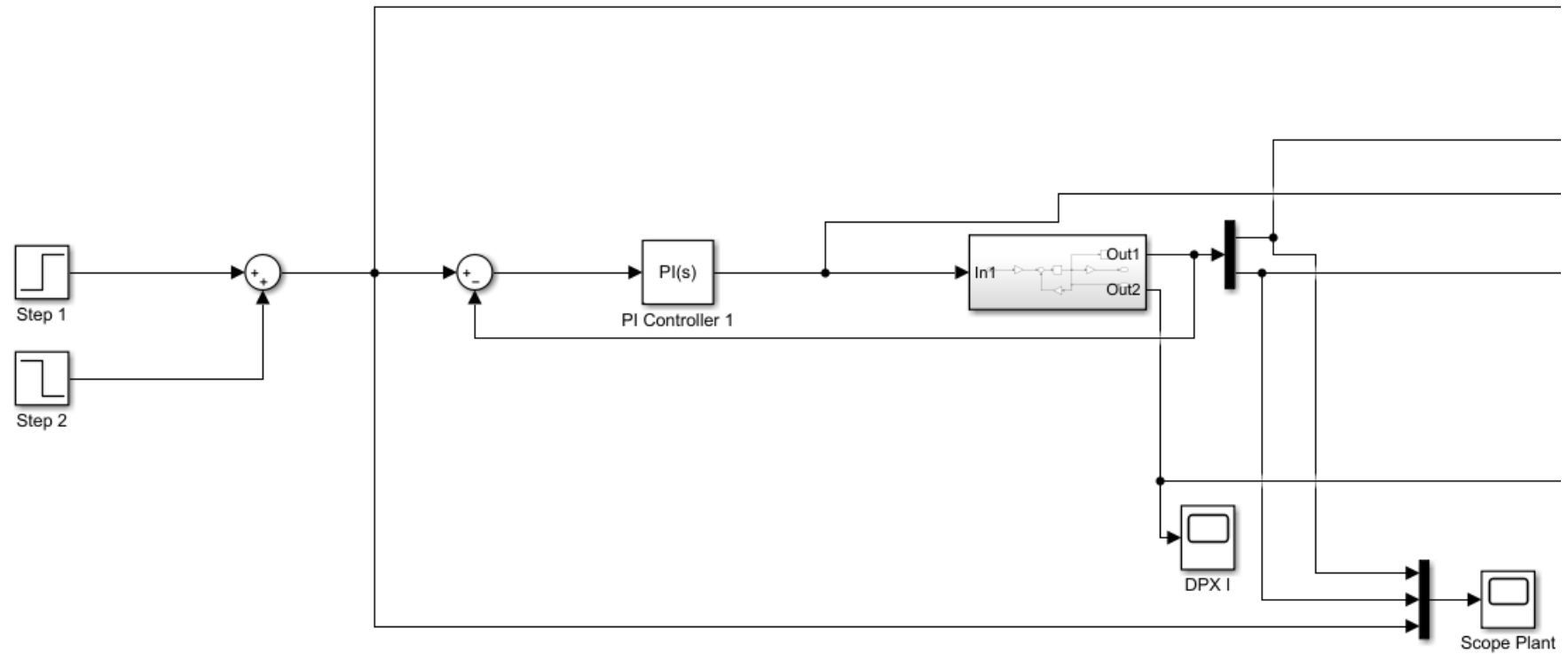
% Simulation with constant gains
gamma = 6;
K1 = 3; K2 = 4.5;
Alpha = [0 1 0 0;
         1 0 0 0];
M1 = T1*[K1*M1d zeros(2);
         zeros(2) eye(2)]*T1';
M2 = T2*[K2*M2d zeros(2);
         zeros(2) eye(2)]*T2';
```

Simulink



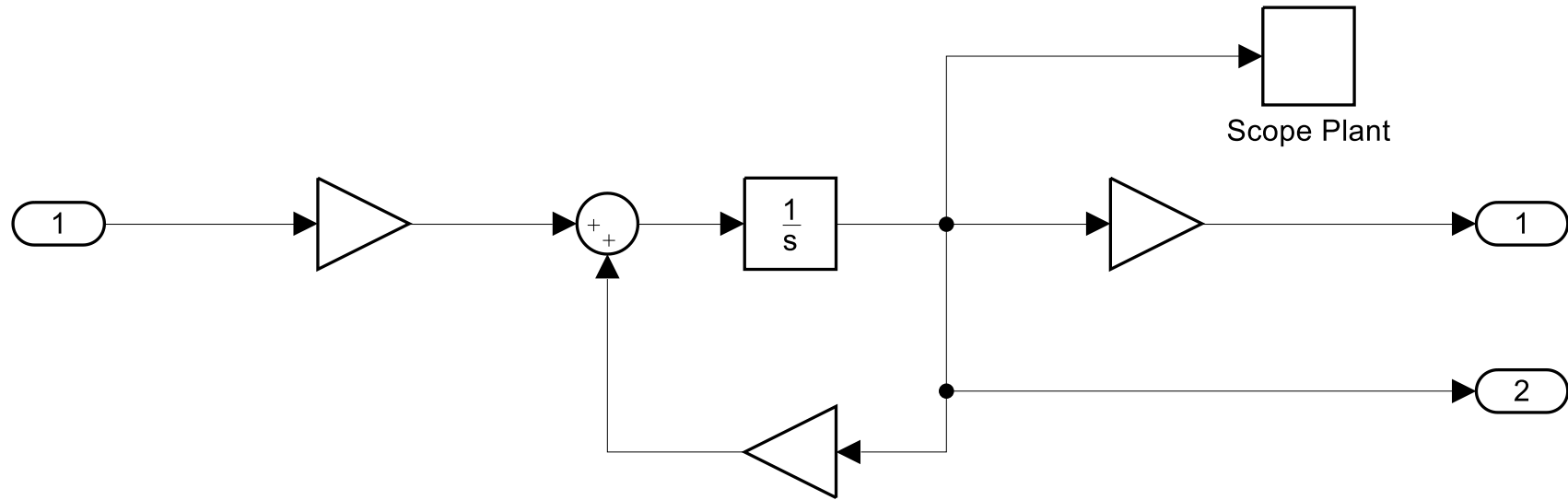
Gambar Diagram dari *Quadruple-tank Process* dengan controller PI Terdesentralisasi

Simulink



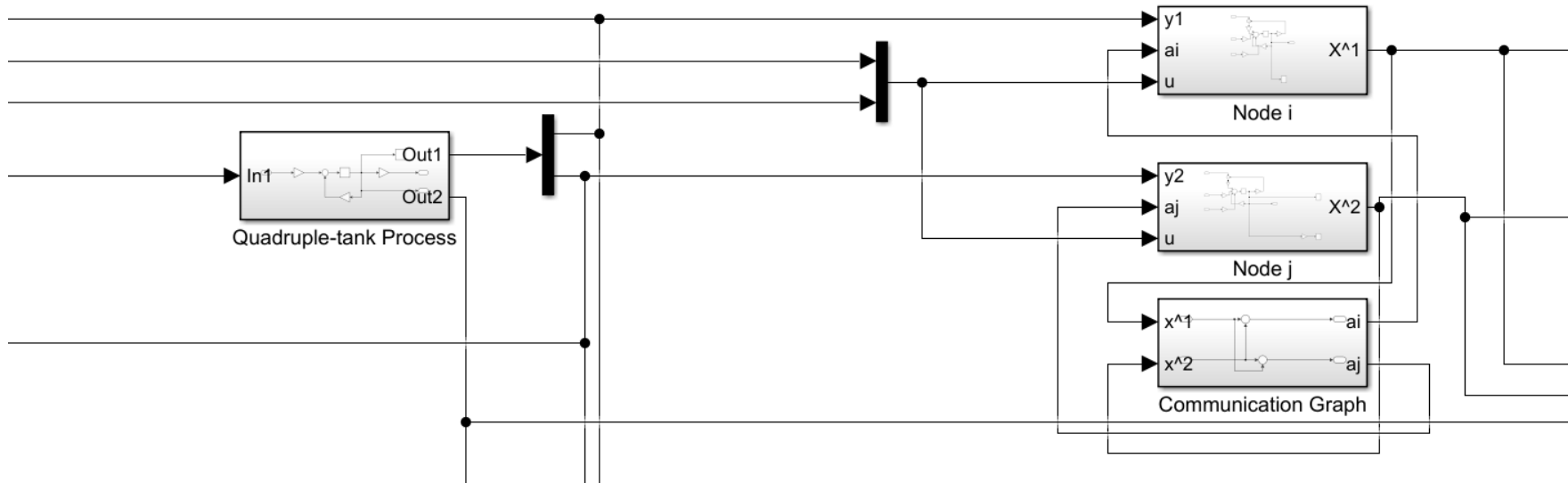
Gambar Diagram dari *Quadruple-tank Process* dengan controller PI Tersentralisasi

Simulink



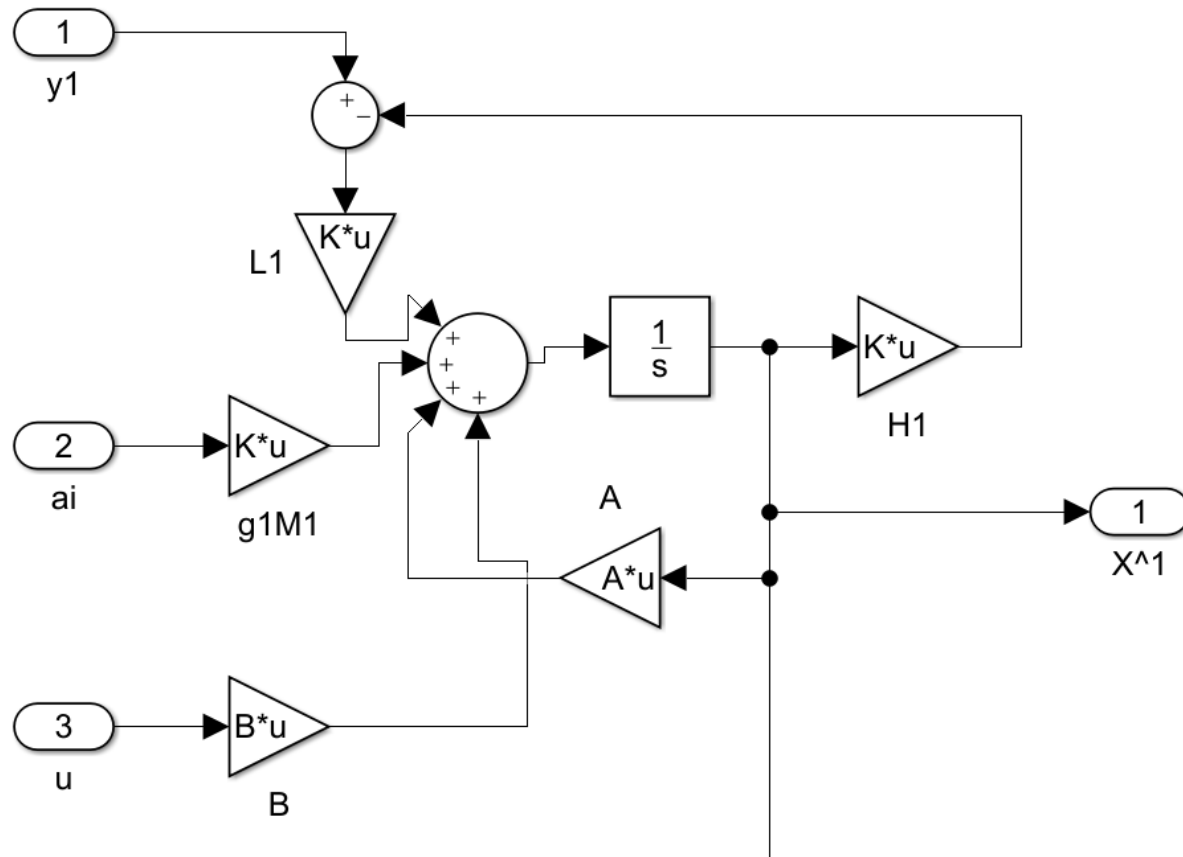
Gambar Model Simulink dari *Quadruple-tank Process*

Simulink



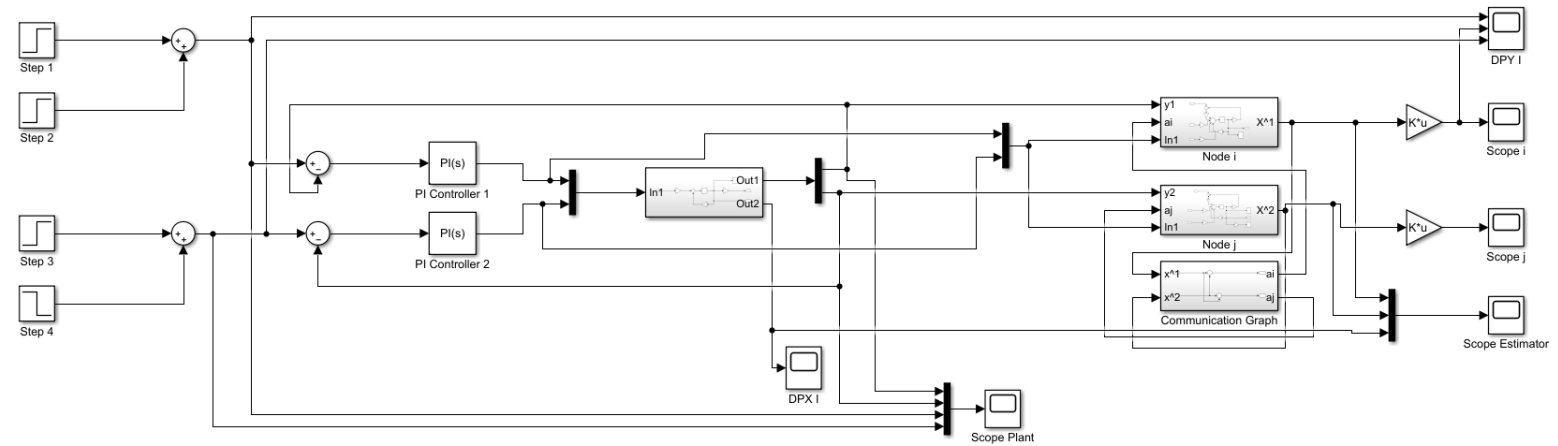
Gambar Diagram Blok Estimasi Terdistribusi

Simulink

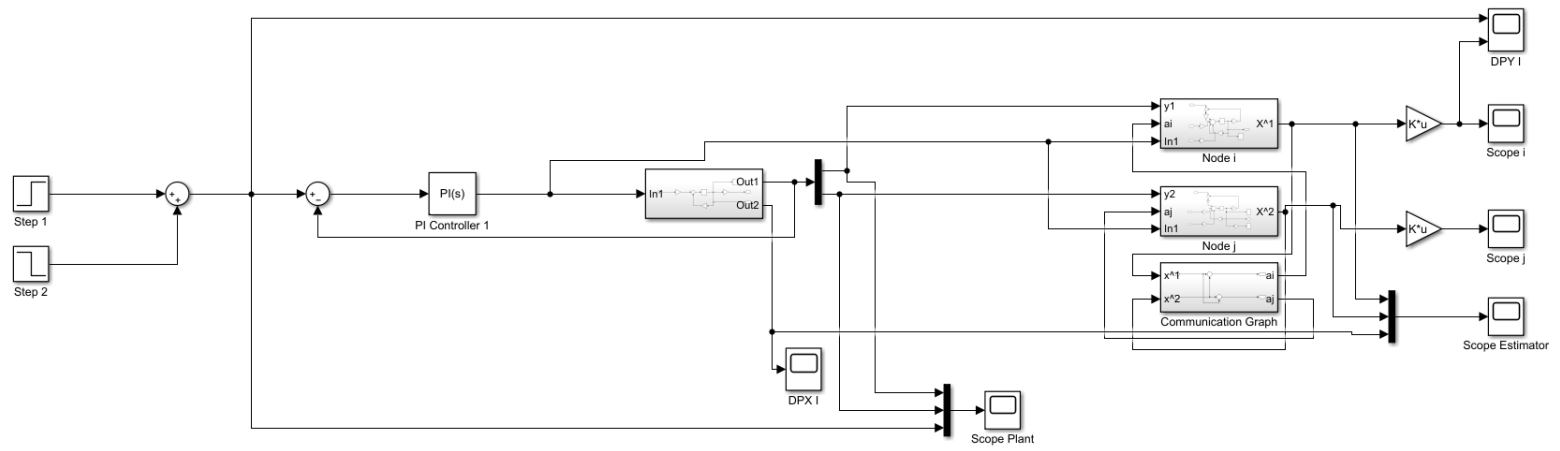


Gambar Diagram blok lokal observer

Simulink



Gambar Diagram Blok Estimasi Terdistribusi dengan controller PI Terdesentralisasi



Gambar Diagram Blok Estimasi Terdistribusi dengan controller PI Tersentralisasi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Arif Muhaimin lahir di Bandung, pada tanggal 15 Juli 1997 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Asy-Syifa hingga tahun 2009, pendidikan menengah pertama di SMP Salman Al Farisi hingga tahun 2012, pendidikan menengah atas di SMA Taruna Bakti hingga tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTIRS di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini.

Saat ini penulis sedang menyelesaikan tugas akhir dengan judul **PERANCANGAN ESTIMATOR TERDISTRIBUSI DENGAN OBSERVER PADA QUADRUPLE-TANK PROCESS**. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email: arifmuhaiminits@gmail.com.