



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN PENGATURAN *LEVEL* PADA *COUPLED TANK*
PROCESS DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MODEL*
*PREDICTIVE CONTROL***

Evira Dyah Puspitarini
NRP 2212100174

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***DESIGN ON COUPLED TANK LEVEL SETTING
PROCESS BY USING MODEL PREDICTIVE CONTROL
METHOD***

Evira Dyah Puspitarini
NRP 2212100174

Supervisor
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

***ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017***

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**Desain Pengaturan Level pada Coupled Tank Process dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Evira Dyah Puspitarini
NRP 2212100174

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN PENGATURAN LEVEL PADA COUPLED
TANK PROCESS DENGAN MENGGUNAKAN
METODE MODEL PREDICTIVE CONTROL**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,


Ir. Rusdianto Effendie A.K., M.T.
NIP. 19570424 198502 1 001


Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.
NIP. 19621005 199003 1 003



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN PENGATURAN *LEVEL* PADA *COUPLED TANK* PROCESS DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MODEL PREDICTIVE CONTROL*

Nama : Evira Dyah Puspitarini
Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
: Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRAK

Plant level coupled tank digunakan pada kebutuhan industri yang melibatkan fluida sebagai penampung minyak atau cairan kimia. *Coupled tank* merupakan *plant* nonlinier yang tersusun dari dua buah tangki yang dihubungkan oleh sebuah pipa atau lubang saluran. Cara kerja dari tank ini dengan mengendalikan aliran dan laju air salah satu tangki sesuai kebutuhan. Kontrol *level* digunakan untuk menjaga titik set *level* terhadap nilai yang diberikan sehingga mampu menerima nilai-nilai *set point* secara dinamis.

Pada tugas akhir ini, digunakan metode *Model Predictive Control* untuk mengendalikan aliran dan laju air. Untuk mengaplikasikan *Model Predictive Control*, perumusan *plant* akan diubah menjadi *plant* linear. Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk mendesain sistem pengendalian *level* dan *flow* pada *coupled-tank process* menggunakan kontroler *Model Predictive Control* yang dapat bekerja memprediksi perilaku sistem pada masa depan yang bergantung pada informasi sistem saat ini.

Pada pengujian didapatkan nilai N_p sebesar 10, nilai N_c sebesar 1, dan nilai tuning parameter sebesar 0,2. Sistem mengalami *settling time* sebesar 39,1002 detik pada tangki 1 dan 40,1051detik pada tangki 2. Sistem mempunyai *error steady state* sebesar 0,015% pada tangki 1 dan 0,005% pada tangki 2.

Kata Kunci : *Coupled Tank Plant*, Dekopling, Kontroler MPC, Observer

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN ON COUPLED TANK LEVEL SETTING PROCESS BY USING MODEL PREDICTIVE CONTROL METHOD

Name : Evira Dyah Puspitarini
Supervisor : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
: Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRACT

Plant level coupled tanks used in industries involving fluid needs as a container of oil or chemicals. Coupled nonlinear plant tank is composed of two tanks connected by pipes or drain holes. The workings of this tank by controlling the flow rate of water and one tank as needed. Level control is used to maintain the set point level to a given value so as to accept the values dynamically set point.

In this thesis, Model Predictive Control method is used to control the rate of flow and water. To apply the Model Predictive Control, the formulation of the plant will be converted into a linear plant. This research aims to design the control system level and flow in the coupled-tank process controllers use Model Predictive Control to work predict the behavior of the system in the future depend on the current system information.

In testing the N_p value obtained by 10, value N_c is 1, and value of the tuning parameter is 0.2. The system encountered settling time by 39.1002 seconds into the first tank 1 and 40.1051 s in the tank 2. The system has error steady state amounted to 0.015% on the tank 1 and 0.005% on the tank 2.

Keywords : Coupled Tank Plant, Decoupling, MPC Controller, Observer

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku tugas akhir dengan judul **“DESAIN PENGATURAN LEVEL PADA COUPLED TANK PROCESS DENGAN MENGGUNAKAN METODE MODEL PREDICTIVE CONTROL”**. Tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerja sama dari berbagai pihak sehingga kendala-kendala tersebut dapat di atasi. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT. karena telah memberi hidayah serta inayah-Nya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua, Ayahanda Hary Wahyudi dan Ibunda Erni Erdiyanti beserta keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
3. Bapak Ir. Rusdhianto Effendie, M.T. dan Bapak Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing atas segala bantuan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Ahmad Fachrudin Istiananda yang tak henti selalu memberikan doa, semangat, dan dukungannya.
5. Teman-teman seperjuangan Nitya, Dwi, Tika, Fauziyah, Hanif, Roni, Dhityo
6. Rekan-rekan e52 khususnya bidang studi Sistem Pengaturan yang banyak membantu penulis dalam memahami akademis.
7. Teman-teman lain yang banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

Surabaya, Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xxiii
KONVENSI PENULISAN TUGAS AKHIR	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
1.6 Relevansi.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Pengaturan Proses	5
2.2 <i>Coupled Tank Plant</i>	6
2.2.1 Karakteristik <i>Plant</i>	8
2.2.2 Pemodelan Sistem Pengaturan <i>Level Plant Coupled Tank</i>	8
2.3 Pemodelan Sistem	10
2.4 <i>Decoupling</i>	12
2.5 Kontroler <i>Model Predictive Control</i> (MPC)	15
2.5.1 Model <i>State-Space</i> dengan <i>Embedded Integrator</i>	16
2.5.2 <i>Prediction of State and Output Variables</i>	18
2.5.3 Indeks performansi kontroler MPC	19
2.5.4 <i>Closed loop Control System</i>	21
2.6 Simulasi Sistem	23
2.6.1 MATLAB	23
2.6.2 LabVIEW	24
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	26

3.1 Identifikasi Sistem	27
3.1.1 Pemodelan <i>Coupled Tank</i>	27
3.1.2 <i>Transfer Function</i>	29
3.2 Desain Dekopling	31
3.3 Perancangan Kontroler	34
3.3.1 Langkah Pengerjaan MPC	34
3.3.2 Desain Kontroler MPC	35
3.4 Perancangan Simulasi	44
3.4.1 MATLAB	44
3.4.2 LabVIEW	45
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA	48
4.1 Simulasi <i>Open Loop</i> Sistem	49
4.2 Simulasi Pengujian dengan Kontroler MPC	50
4.2.1 Blok Diagram <i>Simulink</i>	50
4.2.2 Pengujian Parameter pada Sistem	52
4.3 Simulasi Pengujian Kontroler MPC	60
4.4 Simulasi Pengujian Kontroler MPC pada Sistem tanpa Dekopling	61
4.4.1 Blok Diagram Simulink	62
4.4.2 Hasil Simulasi	62
4.5 Simulasi Pengujian Kontroler MPC pada sistem dengan Dekopling	63
4.5.1 Blok Diagram	64
4.5.2 Hasil Simulasi	64
4.6 Simulasi Uji <i>Set-Point</i>	65
4.7 Simulasi HMI Labview	66
BAB 5 PENUTUP	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
RIWAYAT HIDUP	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem <i>Coupled Tank</i>	7
Gambar 2. 2 Diagram Blok Sistem <i>Coupled Tank</i>	8
Gambar 2. 3 Diagram Blok Pemodelan	9
Gambar 2. 4 Sistem MIMO pada <i>Coupled Tank</i>	13
Gambar 2. 5 Sistem Dekopling pada <i>Coupled Tank</i>	14
Gambar 2. 6 Konsep dari Kontroler <i>Model Predictive Control</i>	16
Gambar 2. 7 Sistem <i>Closed loop</i> Kontroler MPC	23
Gambar 2. 8 Jendela <i>Front Panel</i> dan Blok Diagram LabVIEW	25
Gambar 2.9 Jendela MATLAB	25
Gambar 3. 1 Gambar Konfigurasi MIMO	31
Gambar 3. 2 Bentuk Dekopling <i>Plant</i>	32
Gambar 3. 3 Respon Dekopling	33
Gambar 3. 4 Respon Dekopling dengan <i>Noise</i>	33
Gambar 3. 5 Respon <i>Dekopling</i> dengan <i>Noise</i>	34
Gambar 3. 6 Model Kontroler	35
Gambar 3. 7 Bentuk Diagram Blok <i>Plant</i>	45
Gambar 3. 8 <i>Image Navigator</i> pada LabVIEW	46
Gambar 3. 9 HMI <i>Coupled Tank Plant</i>	47
Gambar 3.10 Diagram Blok HMI	47
Gambar 4. 1 Respon <i>Open Loop</i> Tangki 1	49
Gambar 4. 2 Respon <i>Open Loop</i> Tangki 2	50
Gambar 4. 3 Diagram Blok Kontroler MPC	51
Gambar 4. 4 Observer Kontroler MPC	52
Gambar 4. 5 Uji Nilai N_p Tangki 1	53
Gambar 4. 6 Uji Nilai N_p Tangki 2	54
Gambar 4. 7 Uji Nilai N_c Tangki 1	56
Gambar 4. 8 Uji Nilai N_c Tangki 2	57
Gambar 4. 9 Uji Nilai r_w Tangki 1	59
Gambar 4. 10 Uji Nilai r_w Tangki 2	60
Gambar 4. 11 <i>Disturbance</i> pada Tangki 1 dan Tangki 2	61
Gambar 4. 12 Diagram Blok <i>Plant</i> tanpa Dekopling	62
Gambar 4. 13 Hasil Respon Sistem tanpa Dekopling	62
Gambar 4. 14 Diagram Blok <i>Plant</i> dengan Dekopling	64
Gambar 4. 15 Hasil Respon Sistem dengan Dekopling	64
Gambar 4. 16 Respon <i>Disturbance</i> Sistem tanpa Dekopling	66

Gambar 4. 17 Respon *Disturbance* Sistem dengan Dekopling..... 66

Gambar 4. 18 Tampilan HMI *Coupled Tank* 67

Gambar 4. 19 Respon Tangki 1 67

Gambar 4. 20 Respon Tangki 2 68

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter Pemodelan <i>Plant</i>	9
Tabel 3. 2 Parameter <i>Coupled Tank</i>	10
Tabel 3. 1 Parameter Sistem.....	30
Tabel 3. 2 Titik Kerja <i>Plant</i>	30
Tabel 3. 3 Nilai Parameter	31
Tabel 4. 1 Variasi Nilai N_p Tangki 1	52
Tabel 4. 2 Analisis Nilai N_p Tangki 1	53
Tabel 4. 3 Variasi Nilai N_p Tangki 2	54
Tabel 4. 4 Analisis Nilai N_p Tangki 2	55
Tabel 4. 5 Variasi Nilai N_c Tangki 1	55
Tabel 4. 6 Analisis Nilai N_c Tangki 1	56
Tabel 4. 7 Variasi Nilai N_c Tangki 2	57
Tabel 4. 8 Analisis Nilai N_c Tangki 2	57
Tabel 4. 9 Variasi Nilai r_w Tangki 1	58
Tabel 4. 10 Analisis Nilai r_w Tangki 1	59
Tabel 4. 11 Variasi Nilai r_w Tangki 2	59
Tabel 4. 12 Analisis Nilai r_w Tangki 2	60
Tabel 4. 13 Analisa Respon Tangki 1	63
Tabel 4. 14 Analisa Respon Tangki 2	63
Tabel 4. 15 Analisis Respon Tangki 1	65
Tabel 4. 16 Analisis Respon Tangki 2	65

-

-

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

\mathbf{x}	Vektor <i>state</i> x
x_n	<i>State</i> ke- n
\dot{x}_n	Turunan pertama <i>state</i> ke- n
\mathcal{B}	Semesta bilangan bulat
\mathcal{R}	Semesta bilangan riil
\in	Anggota himpunan
\subseteq	Subhimpunan
\square	Akhir dari pembuktian
\Leftrightarrow	Ekuivalen
\mathbf{I}	Matriks identitas
\mathbf{A}^T	Transpos Matriks \mathbf{A}
\mathbf{A}^{-1}	Invers matriks \mathbf{A}
$\det(\mathbf{A})$	Determinan matriks \mathbf{A}
$\mathbf{A} > 0$	Matriks \mathbf{A} definit positif
$\mathbf{A} < 0$	Matriks \mathbf{A} definit negatif
$diag(a_1, \dots, a_n)$	Matriks diagonal dengan a_i merupakan elemen diagonal ke- i
j	Bilangan imajiner
γ	Tingkat pelemahan
∞	<i>Infinity</i>
$\ \cdot\ _\infty$	∞ -norm
$\ \cdot\ _2$	L_2 -norm
\sup	Nilai <i>supremum</i>
$\sum(\cdot)$	Penjumlahan dari nilai deret
$\prod(\cdot)$	Perkalian dari nilai deret
$\frac{d}{dx}(\cdot)$	Turunan pertama terhadap x
$\frac{\partial}{\partial x}(\cdot)$	Turunan parsial pertama terhadap x

-

Halaman ini sengaja dikosongkan

KONVENSI PENULISAN TUGAS AKHIR

1. Matriks dicetak huruf kapital dan tebal. Contoh: **A, B, C, D**.
2. Vektor dicetak huruf kecil dan tebal. Contoh: **x, y, k**.
3. Matriks dengan tanda bar (misal \bar{A}) menyatakan matriks yang tersusun atas beberapa matriks lain.
4. Nama suatu himpunan dicetak huruf kapital, tegak, serta tidak tebal. Adapun elemen anggota himpunan dicetak huruf kecil, miring, dan tidak tebal. Contoh: himpunan X terdiri dari x_1, x_2, x_3 .
5. Variabel bukan matriks atau vektor dicetak miring dan tidak tebal serta dapat ditulis kapital maupun tidak tergantung pada kegunaannya. Contoh: Gaya (F), panjang (l), dan sebagainya.

-

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada Bab ini berisikan penjelasan awal mengenai penelitian yang akan dilakukan. Penjelasan tersebut meliputi latar belakang masalah, permasalahan yang diangkat, batasan masalah yang digunakan, tujuan dari penelitian ini, sistematika penulisan, penyusunan laporan dan juga relevansi.

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya teknologi instrumentasi pada industri, serta tuntutan terhadap keberhasilan sistem melakukan proses kerjanya agar produksi tetap tercapai perlu dilakukan pengendalian, yang tujuannya adalah agar sistem dapat menjaga kestabilannya dalam suatu proses yang sedang berlangsung secara efektif dan efisien. Ada banyak pengendalian yang harus dikendalikan dalam suatu proses di industri, diantaranya *pressure*, *flow*, *temperature*, *consentration* dan *level*. Pengendalian yang dilakukan diharapkan dapat mempertahankan *life time unit*, memudahkan kerja manusia, mengurangi biaya perawatan, mendapatkan kualitas produksi yang baik, keselamatan dan keamanan lingkungan proses.

Pada industri proses seperti industri *petro-chemical*, pembuatan kertas, dan industri pengolahan air yang melibatkan cairan, suatu cairan akan dipompa dan dialirkan dari satu tangki ke tangki yang lain untuk diolah. Ada beberapa jenis tangki yang banyak digunakan pada industri proses. Ada jenis tangki yang tidak terhubung dengan tangki yang lain (*single tank*) dan ada yang tersusun dari beberapa tangki yang saling berhubungan (*coupled tanks*). [1]

Coupled tanks digolongkan pada *plant* dengan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO) atau proses *Multivariable*. Pengaturan pada *plant* MIMO lebih sulit dibanding *plant* dengan sistem *Single Input Single Output* (SISO). Karena adanya interaksi silang antara variabel masukan dan keluaran, sehingga metode kontrol yang diterapkan pada sistem SISO bisa tidak dapat digunakan secara baik pada sistem MIMO. [2]

Pada pengaturan *level* air di *coupled tanks*, *level* pada tangki kedua akan dipengaruhi oleh aliran cairan dari tangki pertama. Pemindahan cairan dari satu tangki ke tangki yang lain menyebabkan berubahnya *level* cairan dalam tangki. Dalam pengaturan *level*, pemindahan cairan biasa

disebut sebagai pembebanan pada *level*. Perubahan beban ini dapat mempengaruhi dari kinerja kontroler.

1.2 Perumusan Masalah

Plant level-coupled tank dalam penerapannya memiliki nilai beban yang berubah-ubah pada kedua sisinya, sehingga dibutuhkan kontroler yang dapat menyesuaikan nilai parameter yang tepat sesuai dengan perubahan beban yang dilakukan, sehingga *plant* dapat dikontrol dengan stabil.

1.3 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini yang akan dibahas adalah mengenai pengaturan *level* dengan sistem MIMO. Implementasi kontroler pada simulator *plant* yang dibuat pada LabVIEW.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang desain pengaturan *level* pada *Coupled Tank Process* dan Mengimplementasikan kontroler *Model Predictive Control* pada *Coupled Tank Process*. Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi dunia pendidikan, industri dan masyarakat agar dapat dijadikan referensi bagi peneliti lainnya dan sebagai ilmu pengetahuan.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini disusun dalam lima bab yang masing-masing membahas permasalahan yang berhubungan dengan Tugas Akhir yang telah dibuat dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

1. BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, permasalahan, pembatasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi pembahasan Tugas Akhir ini.

2. BAB TINJAUAN PUSTAKA

Menjelaskan tentang teori-teori dasar yang melandasi pembuatan Tugas Akhir ini yang meliputi: gambaran umum mengenai pemodelan sistem, sistem pengaturan proses, *Coupled Tank Process*, dan *Model Predictive Control*.

3. BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Dijelaskan secara detail perancangan sistem yang dibuat, pemodelan *plant*, yaitu *Coupled Tank Process*, perancangan kontroler *Model Predictive Control*, dan perancangan HMI menggunakan LabVIEW.

4. BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA

Berisi data hasil simulasi disertai dengan analisis mengenai hasil yang didapatkan dari pengujian sistem yang dilakukan.

5. BAB 5 PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran-saran untuk pengembangan Tugas Akhir ini.

1.6 Relevansi

Hasil yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah didapatkan desain sistem pengendalian *level* dan *flow* pada *coupled-tank Process* menggunakan kontroler *Model Predictive Control* yang dapat bekerja memprediksi perilaku sistem pada masa depan yang bergantung pada informasi sistem saat ini diharapkan dengan menggunakan kontroler MPC, *coupled tank* dapat mengoptimalkan waktu pengerjaan pada sistem dan lebih cepat mengkompensasi gangguan terukur.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab ini, berisi tentang teori penunjang dari berbagai pustaka atau literatur seperti buku dan *paper* yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang pada bab ini meliputi gambaran umum mengenai pemodelan sistem, sistem pengaturan proses, *Coupled Tank Process*, dan kontroler *Model Predictive Control*.

2.1 Sistem Pengaturan Proses [3]

Sistem pengendalian atau sistem kontrol adalah susunan beberapa komponen yang terangkai membentuk aksi pengendalian. Sistem pengendalian yang diterapkan dalam teknologi proses disebut sistem pengendalian proses. Sistem Pengaturan Proses adalah pengontrolan suatu besaran proses apabila terjadi penyimpangan atau deviasi maka akan terjadi suatu usaha perbaikan secara otomatis sehingga dapat membatasi penyimpangan atau deviasi tersebut dari nilai yang dikehendaki.

Di dalam pengontrolan otomatis peran operator di dalam pengontrolan manual digantikan oleh suatu alat yang disebut kontroler. Operator hanya perlu menentukan besarnya *set point* dari kontroler dan pada akhirnya semua bekerja secara otomatis. Untuk keperluan pengontrolan otomatis, *valve* harus dilengkapi dengan alat yang disebut *actuator*, sehingga *unit valve* sekarang menjadi unit yang disebut *control valve*. Semua peralatan pengendalian ini disebut sebagai instrumentasi pengendalian proses.

Kehandalan operasi meliputi ketahanan terhadap gangguan produktivitas dan kualitas produk. Sistem pengendalian proses harus mampu menekan pengaruh gangguan sehingga dapat mempertahankan kondisi operasi yang mantap (*steady operation*) dalam batas operasional (*operational constraint*). Dengan perkataan lain, pengendalian proses mampu memperkecil keragaman kualitas dan produktivitas. Kualitas dan produktivitas sesuai spesifikasi dengan tingkat keragaman (*variability*) sekecil mungkin. Sistem pengendalian bertujuan menghasilkan kondisi operasi optimum.

Prinsip pengendalian proses terdapat empat fungsi dasar, yaitu: mengukur (*measurement*), membandingkan (*comparison*), menghitung (*computation*, *decision*, atau *evaluation*), dan mengoreksi (*correction* atau *action*).

Dalam contoh pengendalian proses pemanasan minyak dingin dengan penukar panas, termokopel (sebagai sensor) mengukur variabel proses terukur (suhu minyak keluar) kemudian dikirimkan oleh *transmitter* dan diumpan-balikkan ke pengendali. Sinyal pengukuran yang diumpan-balikkan dikurangkan dari *setpoint* dan menghasilkan *error*. Oleh pengendali, *error* dihitung melalui algoritma tertentu untuk menghasilkan sinyal kendali (*controller signal* atau *controller output*). Sinyal kendali dipakai untuk melakukan aksi mekanik katup kendali yang akan mengubah *manipulated variable*. Perubahan *manipulated variable* dipakai untuk menjaga variabel proses terukur pada nilai *setpoint* dari adanya perubahan pada variabel gangguan.

2.2 Coupled Tank Plant

Coupled Tank tersusun dari dua buah tangki yang dihubungkan oleh sebuah pipa atau lubang saluran. *Level* cairan pada tangki pertama ditunjukkan sebagai H_1 dan H_2 adalah *level* tangki kedua. Bila *input* kontrol adalah *flow* Q_1 , maka variabel yang akan dikontrol adalah kedua *Level* H_1 dan H_2 , dengan *disturbance* yang disebabkan oleh variasi *flow* pada *valve* A, *valve* B. Disini akan timbul suatu sistem dengan dua tangki saling berinteraksi. [4]

Sistem *Coupled Tank* dapat dikonfigurasi sebagai sistem SISO atau sebagai Sistem MIMO melalui manipulasi *input* dan *sectional* daerah *valve*.

Sistem pengaturan merupakan otak dari *plant level Coupled Tank*. Dengan sistem pengaturan, *plant level* dapat digunakan untuk melakukan sesuatu yang berguna. Pengaturan didapat dari komponen yang mengubah kecepatan aliran air dan volume aliran guna mengatur *level* air yang diinginkan. Komponen pengaturan biasanya diletakkan pada tempat yang berbeda-beda.

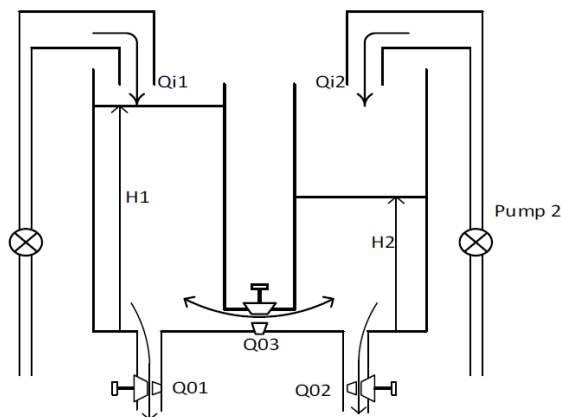
Untuk pengaturan *level*, komponen yang dipakai berupa servo *valve*, yang mengatur besar kecilnya volume air yang dikeluarkan. Semakin terbuka kondisi dari servo *valve* maka aliran air yang keluar akan semakin besar, begitu pula sebaliknya. Buka tutupnya pergerakan servo *valve* diatur oleh sinyal kontrol yang dikirimkan oleh kontroler.

Plant Level mempunyai tujuan utama untuk menghasilkan sesuatu yang berguna pada suatu proses industri. Beban memiliki pengertian komponen yang melakukan usaha dan mengkonsumsi daya. Pada dunia industri, *plant level* berguna untuk melakukan kegiatan yang berhubungan dengan ketinggian cairan, kekentalan cairan dan

pencampuran cairan. Beban pada *plant level* ini terletak pada aktuator berupa *servo valve*.

Indikator merupakan elemen penting pada *plant level Coupled Tank* yang berfungsi sebagai evaluasi *plant*. Indikator ini menunjukkan nilai *level* dan aliran yang sedang terjadi pada *plant level*. Nilai ini dijadikan bahan evaluasi oleh kontroler yang selanjutnya digunakan untuk mengatur pergerakan dari *servo valve* sehingga dapat digunakan untuk mengatur *level* air.

Plant Coupled Tank merupakan tangki dengan konfigurasi dua tangki atau lebih yang saling berhubungan dengan sebuah pipa atau saluran air seperti pada Gambar 2.1. Adanya hubungan antara tangki ini membuat *level* cairan pada setiap tangki saling berinteraksi atau berhubungan. Konfigurasi tangki seperti ini banyak digunakan pada industri proses seperti industri *petro-chemical*, pembuatan kertas, dan industri pengolahan air.



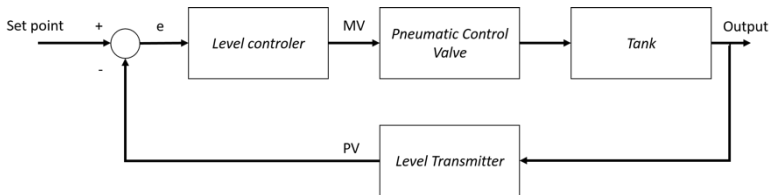
Gambar 2. 1 Sistem *Coupled Tank* [5]

Level cairan pada tangki pertama ditunjukkan sebagai H_1 dan H_2 untuk *level* tangki kedua. *Flow* cairan yang masuk pada tangki dilambangkan sebagai Q_i . Untuk *flow* cairan yang keluar dari tangki ditunjukkan sebagai Q_b untuk tangki pertama, Q_c tangki kedua, dan Q_a sebagai *flow* interaksi antara tangki pertama dan tangki kedua. Sistem *Coupled Tanks* dapat dikonfigurasi sebagai sistem *Single Input Single Output* (SISO), *Multi Input Multi Output* (MIMO), atau *Single*

Input Multi Output (SIMO) berdasarkan manipulasi masukan pada pompa dan daerah kerja dari *rotary valve* yang terdapat pada *plant Coupled Tanks*. [6]

2.2.1 Karakteristik *Plant*

Konfigurasi *single loop* merupakan konfigurasi sistem kendali paling sederhana dimana hanya terdapat satu buah *loop* dengan satu kontroler untuk memenuhi objektif kontrol. Diagram blok dari sistem pengaturan dengan konfigurasi *single loop* ini sama seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Diagram Blok Sistem *Coupled Tank*

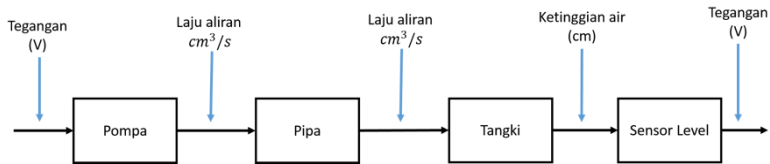
Pengontrolan yang dipakai pada *plant* ini adalah pengontrolan *loop* tertutup dengan *feedback*. Aksi pengontrolan ini keluarannya sangat memengaruhi proses pengontrolan sistem. Keluaran yang dihasilkan sangat tergantung pada keluaran pada aksi pengontrolan sebelumnya. Keluaran yang terjadi selalu diumpan balikkan sebagai pembandingan untuk keluaran selanjutnya. Apabila terjadi penyimpangan, maka kontroler akan melakukan penyesuaian sendiri untuk meminimalisir penyimpangan tersebut.

Sistem kontrol *loop* tertutup juga merupakan sistem kontrol berumpan balik. Sinyal kesalahan penggerak, yang merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran atau turunannya). Diumpankan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan. Dengan kata lain, istilah “*loop* tertutup” berarti menggunakan aksi umpan balik untuk memperkecil kesalahan sistem.

2.2.2 Pemodelan Sistem Pengaturan *Level Plant Coupled Tank*

Sistem yang akan dirancang adalah sistem pengaturan *level* dengan konfigurasi MIMO yaitu pengaturan *level* pada tangki pertama dan kedua, dengan ditunjukkan masukan berupa tegangan pada pompa air untuk memberi aliran air masuk ke tangki dan keluaran berupa *level*

air pada tangki satu atau dua. Model dari *plant Coupled Tank* seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Diagram Blok Pemodelan

Parameter yang digunakan pada pemodelan sistem pengaturan *level* ini dapat dilihat pada Tabel 2.1. Dalam pemodelan suatu sistem diperlukan juga untuk mengetahui karakteristik dari komponen setiap penyusun sistem. Sebagai contoh pada pompa perlu diketahui berapa tegangan maksimal kerja pompa, cara kerja dari pompa. Dengan diketahui dengan detail mengenai karakteristik dari sistem maka model matematis yang akan dibuat bisa lebih akurat dan juga dalam *real* sistem maka akan diketahui permasalahan yang timbul apabila ada karakteristik dari setiap komponen yang diabaikan. [7]

Tabel 2. 1 Parameter Pemodelan *Plant* [7]

Simbol	Keterangan	Satuan
Q_{i1}, Q_{i2}	Debit air yang masuk ke tangki	cm/s
Q_{o1}, Q_{o2}	Debit air yang keluar dari tangki 1 dan 2	cm/s
Q_{o3}	Debit air yang keluar dari tangki 1 menuju tangki 2	cm/s
H_1, H_2	Ketinggian air dalam tangki 1 dan 2	cm
A	Luas penampang	cm ²
a	Luas penampang lubang keluaran tangki 1 dan 2 dan saluran penghubung antara tangki 1 dan 2	cm ²

Simbol	Keterangan	Satuan
β_1, β_2	Rasio bukaan katup (<i>valve</i>) pada lubang keluaran tangki 1 dan 2	
β_x	Rasio <i>valve</i> antara tangki 1 dan 2	
$h_{1s(s)}, h_{2s(s)}$	Ketinggian air (<i>steady state</i>)	
g	Gravitasi	cm^2/s
k_1, k_2	<i>Gain</i> pompa 1 dan 2	

2.3 Pemodelan Sistem [8]

Sistem *Coupled Tank* terdiri dari dua tangki vertikal interkoneksi oleh saluran aliran yang menyebabkan ketinggian dari dua tangki berinteraksi. Setiap tangki memiliki pompa independen untuk masuknya cairan. Luas penampang dari bukaan katup dan dasar dari masing-masing tangki dan saluran menghubungkan dua tangki dapat divariasikan dengan *rotary valves*. Sistem *Coupled Tank* dapat dikonfigurasi sebagai SISO atau sebagai sistem MIMO melalui manipulasi pompa *input* dan *sectional* daerah dari *rotary valves*.

Berdasarkan hukum kesetimbangan massa, persamaan dinamis setiap tangki adalah:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - Q_{o1} - Q_{o3} \quad (2.1)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - Q_{o2} - Q_{o3} \quad (2.2)$$

Dimana, H_1 , H_2 masing-masing adalah tinggi dari cairan pada tangki 1 dan 2, A_1 dan A_2 adalah luas penampang tangki 1 dan tangki 2. Q_{o3} adalah debit air yang keluar dari tangki 1 menuju tangki 2. Q_{i1} dan Q_{i2} adalah debit air dari pompa masing-masing menuju tangki 1 dan tangki 2. Q_{o1} dan Q_{o2} adalah debit air keluar masing-masing dari tangki 1 dan tangki 2.

Dari Persamaan Bernoulli untuk cairan non-kental, mampat cairan dalam aliran didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$Q_{01} = s_1 \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \sqrt{H_1}} = \alpha_1 \sqrt{H_1} \quad (2.3)$$

$$Q_{02} = s_2 \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \sqrt{H_2}} = \alpha_2 \sqrt{H_2} \quad (2.4)$$

$$Q_{03} = s_3 \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \sqrt{H_1 - H_2}} = \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.5)$$

dimana, α_1 , α_2 , dan α_3 merupakan konstanta proporsional dimana bergantung dari koefisien debit area yang saling silang dan konstan gravitasi. Dengan menggunakan nilai dari (2.3) ke (2.5) di (2.1) dan (2.2) persamaan nonlinear menggambarkan dinamika multi-*input* dan multi-*output* sistem berasal.

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - \alpha_1 \sqrt{H_1} - \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.6)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - \alpha_2 \sqrt{H_2} - \alpha_3 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (2.7)$$

Mengingat adanya perubahan yang kecil dari q_1 dan q_2 di kedua *input control* masing-masing, h_1 dan h_2 akan menjadi hasil perubahan dari *level* dua tangki. Model linierisasi didapat menjadi:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = q_1 - \frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} h_1 - \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.8)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = q_2 - \frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_2}} h_2 + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.9)$$

Dinamika *plant* ini dapat dimodelkan dengan persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{k_1}{A} U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} H_1(t) + \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \quad (2.10)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{k_2}{A} U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2(t) - \frac{\beta_{xa}}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \quad (2.11)$$

2.4 Decoupling [9]

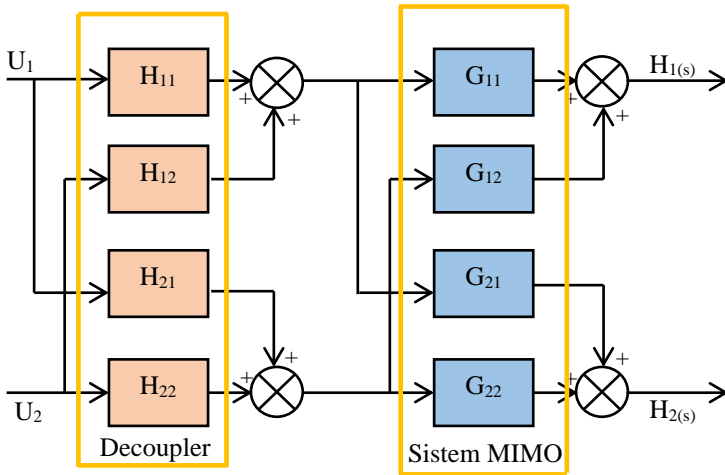
Pada dunia industri, sering terjadi interaksi antara variabel *input-output*. Perubahan suatu *input* kadang tidak hanya berpengaruh pada satu *output* saja, melainkan berpengaruh juga pada *output* lain, atau yang disebut dengan *Multi Input Multi Output* (MIMO). Pemodelan sistem ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Plant Coupled-Tank memiliki dua *input* dan *output* yang punya pengaruh silang. Pada Gambar 2.4, *output* $h_1(t)$ tidak hanya dipengaruhi oleh $u_1(t)$ tetapi juga dipengaruhi oleh $u_2(t)$, begitu juga dengan $h_2(t)$. *Plant* pada proses semacam ini dapat disederhanakan seakan-akan seperti proses SISO dengan teknik *Decoupling*. *Decoupling* mentransformasikan model MIMO ke dalam SISO untuk memudahkan analisis dan perancangan kontroler.

Hubungan suatu *input* berpengaruh pada *output loop* lainnya. Penulisan model untuk Gambar 2.4 adalah:

$$\text{Loop 1 : } Y_1 = G_{11}X_1 + G_{12}X_2 \quad (2.12)$$

$$\text{Loop 2 : } Y_2 = G_{21}X_1 + G_{22}X_2 \quad (2.13)$$



Gambar 2. 4 Sistem MIMO pada *Coupled Tank*

Untuk mengurangi interaksi *control loop*, dapat ditambahkan dekopler pada konfigurasi *multiloop* konvensional. Sistem kontrol dekopling memberi dua keuntungan:

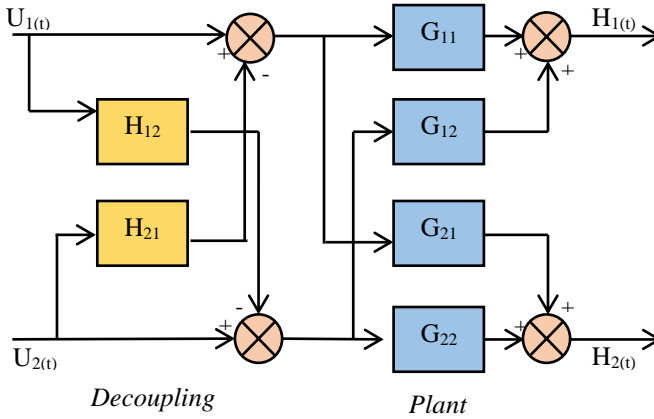
- Interaksi *control loop input* lain dihilangkan sehingga stabilitas sistem *closed loop* sistem ditentukan oleh karakteristik *feedback closed loop input* itu sendiri
- Perubahan *setpoint* pada satu pengubah terkendali tidak mempengaruhi pengubah-pengubah terkendali yang lain.

Salah satu jenis kontrol dekopling untuk proses dengan dua *input* dan dua *output* diperlihatkan pada Gambar 2.5. Tampak bahwa terdapat 2 dekopler D_{12} dan D_{21} yang berada sebelum diagram blok sistem MIMO.

Dekopler dirancang untuk mengkompensasi interaksi proses yang tidak diinginkan. Untuk memperoleh persamaan pada tiap dekopler maka dilakukan analisa terpisah pada tiap *input-output*, sehingga diperoleh nilai D_{12} , sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Y_1 &= G_{11}X_1^* + G_{12}X_2 \\ X_1^* &= X_1 + D_{12}X_2 \\ Y_1 &= G_{11}X_1 + G_{11}D_{12}X_2 + G_{12}X_2 \end{aligned}$$

$$Y_1 = G_{11}X_1 + (G_{11}D_{12} + G_{12})X_2 \quad (2.14)$$



Gambar 2. 5 Sistem Dekopling pada *Coupled Tank*

Agar *output* Y_1 hanya dipengaruhi nilainya dari *input* X_1 , nilai *input* X_2 harus sama dengan 0 ($X_2=0$), sehingga persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} (G_{11}D_{12} + G_{12})X_2 &= 0 \\ G_{11}D_{12} + G_{12} &= 0 \\ D_{12} &= -G_{12}/G_{11} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Untuk nilai D_1 diperoleh dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Y_2 &= G_{22}X_2^* + G_{21}X_1 \\ X_2^* &= D_{21}X_1 + X_2 \\ Y_2 &= G_{22}D_{21}X_1 + G_{22}X_2 + G_{21}X_1 \\ Y_2 &= G_{22}X_2 + (G_{22}D_{21} + G_{21})X_1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Agar *output* Y_2 hanya dipengaruhi nilainya dari *input* X_2 , nilai *input* X_1 harus sama dengan 0 ($X_1=0$), sehingga persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} (G_{22}D_{21} + G_{21})X_1 &= 0 \\ G_{22}D_{21} + G_{21} &= 0 \\ D_{21} &= -G_{21}/G_{22} \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.5 Kontroler *Model Predictive Control* (MPC) [10]

Model Predictive Control (MPC) atau sistem kendali prediktif termasuk dalam konsep perancangan pengendali berbasis model proses, dimana model proses digunakan secara eksplisit untuk merancang pengendali dengan cara meminimumkan suatu fungsi kriteria. Ide yang mendasari pada setiap jenis MPC adalah:

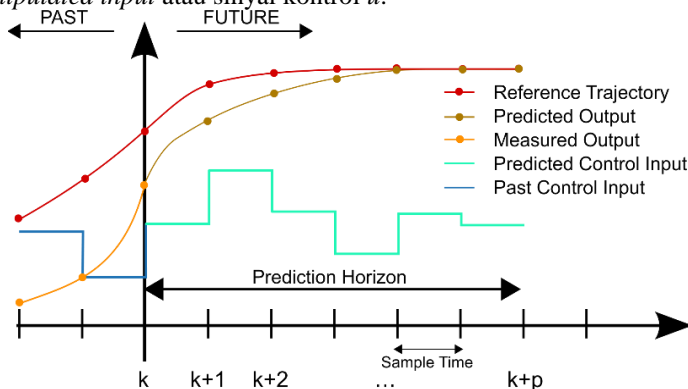
- a. Penggunaan model proses secara eksplisit untuk memprediksi keluaran proses yang akan datang dalam rentang waktu tertentu (*horizon*)
 - b. Perhitungan srangkaian sinyal kendali dengan meminimasi suatu fungsi kriteria
 - c. Strategi surut, pada setiap waktu pencuplikan (pada waktu k) *horizon* dipindahkan menuju waktu pencuplikan berikutnya (pada waktu $k + 1$) dengan melibatkan pemakaian sinyal kendali pertama (yaitu $u(k)$) untuk mengendalikan proses, dan kedua prosedur di atas diulang dengan menggunakan informasi terakhir.
- Metode MPC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode pengendali lainnya, di antaranya adalah:

- a. Konsepnya sangat intuitif serta penalarannya mudah
- b. Dapat digunakan untuk mengendalikan proses yang beragam, mulai dari proses yang sederhana, hingga proses yang kompleks, memiliki waktu tunda yang besar, *non-minimum phase* atau proses yang tidak stabil
- c. Dapat menangani sistem multivariabel
- d. Mempunyai kompensasi terhadap waktu tunda
- e. Mempunyai kemampuan dari pengendali *feed forward* untuk mengkompensasi gangguan yang terukur.
- f. Mudah untuk mengimplementasikan pengendali yang diperoleh
- g. Dapat memperhitungkan batasan atau *constraint* dalam merancang pengendali
- h. Sangat berguna jika sinyal acuan untuk masa yang akan diketahui

Selain beragam keuntungan yang dimiliki, metode MPC juga mempunyai kelemahan, yaitu masalah penurunan aturan sinyal kendali yang cukup kompleks dan keperluan akan model proses yang baik.

Tujuan utama dari sebuah *Model Predictive Control* (MPC) adalah untuk menghitung trayektori dari sinyal kontrol u (*manipulated variable*) yang akan datang untuk mengoptimalkan perilaku yang akan

datang (*future behavior*) pada sinyal *output* y pada sebuah *plant* berdasarkan pada nilai pengukuran saat ini dan prediksi dari nilai *output* yang akan datang. Objektif dari kontroler MPC adalah untuk menentukan nilai sinyal kontrol (*sequence of control moves*) sehingga nilai *output* yang diprediksi akan mendekati nilai *setpoint* dengan optimal. Pada Gambar 2.15, dapat dilihat susunan dari nilai *output* saat ini (*actual output*) y , nilai *output* terprediksi (*predicted output*) \hat{y} , dan *manipulated input* atau sinyal kontrol u .



Gambar 2. 6 Konsep dari Kontroler *Model Predictive Control* [11]

Pada setiap waktu *sampling* k , kontroler MPC menghitung himpunan dari nilai M atau *control horizon* (selanjutnya disebut N_c) dari *input* $\{u(k+i-1), i=1, 2, \dots, M\}$. Nilai *input* akan ditahan pada nilai konstan setelah M langkah didalam sinyal kontrol tersebut. Nilai *input* akan dihitung sedemikian sehingga nilai himpunan dari P keluaran atau

output terprediksi $\{y(k+i), i=1, 2, \dots, P\}$ mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan. P merupakan nilai dari *prediction horizon* (selanjutnya disebut N_p) pada kontroler MPC. Perhitungan nilai kontrol pada kontroler MPC dihitung berdasarkan nilai optimal dari suatu fungsi objektif atau indeks performansi J .

2.5.1 Model State-Space dengan *Embedded Integrator*

Sistem *Model Predictive Control* didesain berdasarkan oleh model matematika *plant*. Model *plant* yang akan digunakan untuk desain *system control* dirubah menjadi model *state space* yang diperlukan untuk memprediksi respon kedepan yang diwakilkan oleh

variable saat ini. Untuk mempermudah, diasumsikan *plant* merupakan sistem *single-input* dan *single output* yang dapat dideskripsikan sebagai berikut :

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.18)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (2.19)$$

di mana u adalah variabel manipulasi, y adalah variabel *output* dan x_m adalah variabel *state*. Dikarenakan prinsip dari *receding horizon control*, dimana *state* saat ini dibutuhkan untuk menghitung prediksi dan kontrol, maka dapat diasumsikan bahwa *input* $u(k)$ tidak dapat mempengaruhi *output* $y(k)$ pada waktu yang sama. Oleh karena itu D_m dapat diabaikan, sehingga Persamaan (2.18) dan Persamaan (2.19) dapat ditulis sebagai berikut :

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.20)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (2.21)$$

Kedua sisi dari Persamaan (2.20) dilakukan operasi beda, sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} x_m(k+1) - x_m(k) &= A_m(x_m(k) - x_m(k-1)) \\ &\quad + B_m(u(k) - u(k-1)) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Persamaan beda variabel *state* dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k) \quad (2.23)$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad (2.24)$$

Sedangkan untuk persamaan beda variabel *control* dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (2.25)$$

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (2.26)$$

Untuk menghubungkan $\Delta x_m(k)$ ke *output* $y(k)$ maka dibentuk vektor variabel *state* baru yaitu,

$$x(k) = [\Delta x_m(k)^T y(k)]^T \quad (2.27)$$

$$y(k+1) - y(k) = C_m(x_m(k+1) - x_m(k)) = C_m \Delta x_m(k)$$

Atau

$$y(k+1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (2.28)$$

Persamaan (2.27) dan Persamaan (2.28) digabungkan membentuk model *state space*,

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \\ &+ \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} o_m & 1 \end{bmatrix}}^c \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

dimana $o_m = \overbrace{[0 \ 0 \ \dots \ 0]}^{n_1}$, sedangkan matriks A,B, dan C disebut dengan matriks *augmented* yang akan digunakan untuk desain dari *predictive control*.

2.5.2 Prediction of State and Output Variables

Setelah mendapatkan *augmented* model, langkah selanjutnya merupakan menghitung nilai *output* terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang. Variabel kontrol yang akan datang dapat dinotasikan seperti pada Persamaan (2.31).

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (2.31)$$

k_i merupakan instan *sampling* sedangkan N_c merupakan nilai *control horizon*, yaitu jumlah langkah kontrol berkelanjutan yang diterapkan dan diprediksi oleh kontroler MPC dalam sebuah *sampling time*. Selain itu, variabel *output* terprediksi dapat diperkirakan dan diprediksi dalam jumlah sampel N_p , dimana N_p merupakan nilai

prediction horizon. Adapun variabel *output* terprediksi dapat dituliskan dalam Persamaan (2.32).

$$x(k_i + 1|k_i), \dots, x(k_i + m|k_i), \dots, x(k_i + N_p|k_i) \quad (2.32)$$

Dimana $x(k_i + 1|k_i)$ merupakan variabel *state* yang terprediksi saat $k_i + m$ dengan diberikan informasi *plant* saat ini $x(k_i)$, nilai N_c harus lebih kecil atau sama dengan nilai N_p . Setelah itu, nilai *output* terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.33).

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (2.33)$$

di mana matriks F , Φ , dan ΔU dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\Delta U = [u(k_i) \Delta u(k_i + 1) \dots \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \quad (2.34)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2} & CA^{N_p-3} & \dots & CA^{N_p-N_c} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

2.5.3 Indeks performansi kontroler MPC

Dalam sebuah kontroler MPC, diperlukan proses optimasi yang mempunyai objektif kontrol untuk meminimalkan *error* yang terbentuk dari selisih nilai referensi dengan nilai keluaran dari *plant*. Optimasi tersebut dilakukan dengan mendeskripsikan sebuah nilai dan parameter indeks performansi J yang merefleksikan objektif kontrol dari kontroler MPC. Indeks performansi tersebut dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$R_s^T = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]}^{N_p} r(k_i) \quad (2.37)$$

$$R_s = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]^T}^{N_p} r(k_i) = \bar{R}_s r(k_i) \quad (2.38)$$

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (2.39)$$

R_s merupakan vektor yang berisi informasi sinyal referensi sinyal *set point* yang dinotasikan pada Persamaan (2.38). Persamaan $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$ pada Persamaan (2.39) indeks performansi J mempunyai tujuan untuk meminimalkan *error* yang terjadi antara nilai *output* yang terprediksi dengan *setpoint* yang diberikan. Sedangkan persamaan $\Delta U^T \bar{R} \Delta U$ untuk merefleksikan seberapa besar nilai ΔU yang akan dihasilkan ketika fungsi objektif indeks performansi J dibuat sekecil mungkin. Matriks \bar{R} adalah matriks diagonal yang berbentuk $\bar{R} = r_w I_{N_p \times N_p}$ ($r_w \geq 0$) digunakan sebagai parameter tuning kontroler MPC. Variabel r_w merupakan tuning parameter untuk performa *closed loop* system pada kontroler MPC. Pada saat nilai $r_w = 0$, indeks performansi J akan mempunyai objektif untuk meminimalkan nilai *error* $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$ sekecil mungkin tanpa memperdulikan seberapa besar nilai ΔU . Untuk kasus dimana nilai r_w dibuat semakin besar, indeks performansi J pada Persamaan (2.39) akan diterjemahkan ke dalam situasi dimana kita akan meminimalkan nilai *error* $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$ secara hati-hati dengan mempertimbangkan seberapa besar nilai ΔU yang akan dihasilkan kontroler MPC. Indeks performansi dapat juga dinotasikan sebagai Persamaan (2.40).

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (2.40)$$

Setelah itu, Persamaan (2.40) diturunkan terhadap ΔU sehingga persamaannya menjadi seperti Persamaan (2.41)

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = (R_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (2.41)$$

Kondisi yang dibutuhkan untuk meminimalkan indeks performansi dicari pada kondisi sebagai berikut :

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0 \quad (2.42)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (2.41) dengan Persamaan (2.42) maka dapat disimpulkan solusi optimal dari sinyal *control* pada kontroler MPC sebagai Persamaan (2.43)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (2.43)$$

2.5.4 Closed loop Control System

Nilai optimal parameter pada vektor ΔU mengandung sinyal *control* $\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1)$ tetapi hanya sampel pertama dari urutan atau sequence yang dapat diimplementasikan dan mengabaikan urutan selanjutnya. Prinsip tersebut disebut dengan *Receding Horizon Control* (RHC). Ketika periode *sampling* selanjutnya datang, nilai pengukuran yang paling baru diambil dari *state vector* $(k_i + 1)$ untuk perhitungan sinyal kontrol yang baru. Prosedur ini terus berlanjut pada kondisi *real time* untuk memenuhi prinsip RHC. Oleh karena itu, sinyal *control* yang didapatkan dari Persamaan (2.43) dapat ditulis ulang seperti pada Persamaan (2.44).

$$\Delta u = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T R_s r(k_i) - \Phi^T Fx(k_i))$$

Atau

$$\Delta u = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \quad (2.44)$$

Dimana K_y adalah baris pertama dari matriks $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T R_s$ dan K_{mpc} adalah baris pertama dari matriks $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F$. Persamaan (2.44) adalah bentuk standar dari linear *time-invariant state feedback control*. Gain dari *state feedback control* adalah K_{mpc} . Untuk mencari persamaan system *closed loop* pada kontroler MPC, digunakan *augmented model*. Seperti pada Persamaan (2.45).

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \quad (2.45)$$

Sistem *closed loop* seperti pada GAMBAR dapat dicari dengan

mensubstitusi Persamaan (2.44) ke dalam Persamaan (2.45) dan mengganti indeks k_i ke dalam k sebagai mana Persamaan (2.46).

$$x(k+1) = Ax(k) - BK_{mpc}x(k) + BK_y r(k)$$

atau

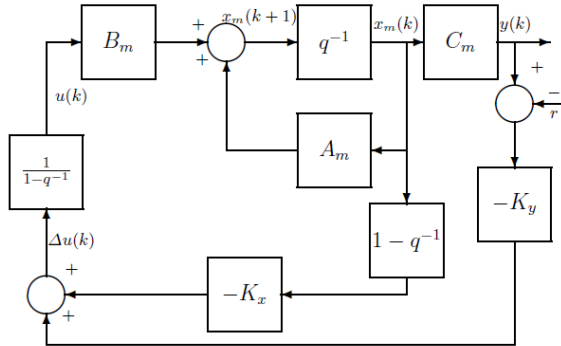
$$x(k+1) = (A - BK_{mpc})x(k) + BK_y r(k) \quad (2.46)$$

Nilai eigenvalues pada system *closed-loop* dapat ditekan dengan mengamati persamaan karakteristik *closed-loop* seperti pada Persamaan (2.47).

$$\det[\lambda I - (A - BK_{mpc})] = 0 \quad (2.47)$$

Dikarenakan struktur unik dari matriks A dan C, kolom terakhir dari matriks F identik dengan matriks \overline{R}_s , yaitu $[1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$. Oleh karena itu, *gain* K_y identik dengan elemen terakhir pada *gain* K_{mpc} .

Perlu dicatat bahwa nilai vektor *state variable* $x(k) = [\Delta x_m(k)^T \ y(k)]^T$ dan dengan definisi K_y sehingga dapat mendeklarasikan bahwa *gain* $K_{mpc} = [K_x \ K_y]$, dimana K_x mendefinisikan hubungan *feedback gain vector* dengan $\Delta x_m(k)$. Sedangkan K_y mendefinisikan hubungan antara *gain* dengan $y(k)$. Oleh karena itu, blok diagram sistem *closed-loop* pada kontroler MPC seperti pada Gambar 2.16. Notasi q^{-1} merupakan notasi *backward shift operator* dan $\frac{1}{1-q^{-1}}$ menotasikan *discrete-time integrator*.



Gambar 2. 7 Sistem *Closed loop* Kontroler MPC [12]

2.6 Simulasi Sistem

2.6.1 MATLAB [13]

MATLAB merupakan paket program dengan bahasa pemrograman yang tinggi untuk mengembangkan algoritma, visualisasi data, dan komputasi numerik. Program MATLAB ini dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah komputasi dengan lebih cepat dibandingkan dengan bahasa pemrograman tradisional, seperti C, C++, dan Fortran. MATLAB digunakan untuk banyak aplikasi seperti *signal and image processing*, desain kontrol, pengujian dan pengukuran, permodelan, dan analisis.

Simulink merupakan bagian dari MATLAB untuk memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisa sistem dinamik. *Simulink* dapat membentuk *model* dari awal atau memodifikasi *model* yang sudah ada sesuai dengan apa yang diinginkan. Selain itu *simulink* juga mendukung sistem *linier* dan *non-linier*, permodelan waktu kontinyu atau diskrit, atau gabungan. *Simulink* ini dapat digunakan sebagai media untuk menyelesaikan masalah dalam industri nyata meliputi kedirgantaraan dan pertahanan, otomotif, komunikasi, elektronik dan pemrosesan sinyal,

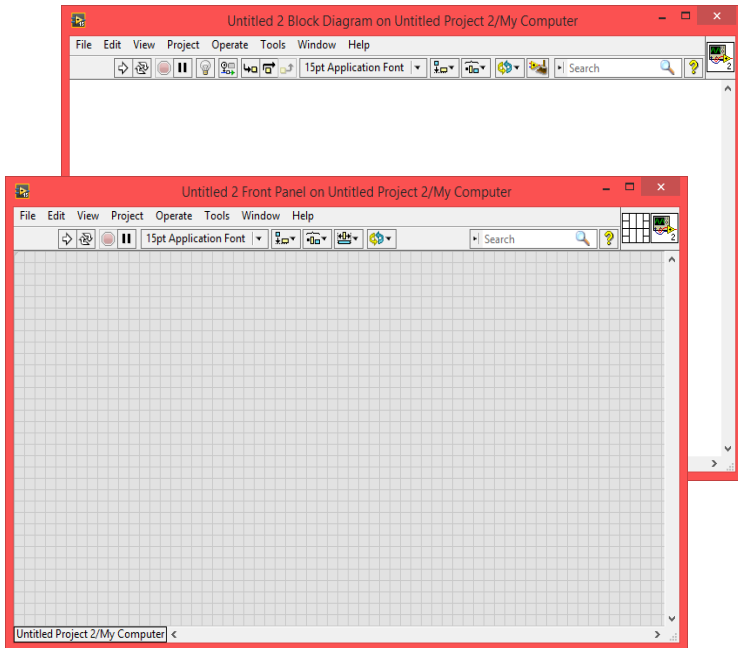
Salah satu modul dalam *Simulink* yang dapat digunakan untuk komunikasi perangkat keras adalah *Instrument Control Toolbox*. Modul ini merupakan kumpulan fungsi *m-file* yang dibangun pada lingkungan komputasi teknis MATLAB. *Toolbox* ini menyediakan kerangka kerja untuk komunikasi instrumen yang mendukung *GPIB interface*, standar

VISA, TCP/IP, dan protokol UDP. *Toolbox* ini memperluas fitur dasar *serial port* yang ada dalam MATLAB. Selain itu *toolbox* ini berfungsi untuk komunikasi data antara *workspace* MATLAB dan peralatan lainnya. Data tersebut dapat berbentuk biner atau *text*.

Komunikasi *serial* merupakan protokol dasar tingkat rendah untuk komunikasi antara dua peralatan atau lebih. Pada umumnya satu komputer dengan *modem*, *printer*, mikrokontroler, atau peralatan lainnya. *Serial port* mengirim dan menerima informasi *bytes* dengan hubungan seri. *Bytes* tersebut dikirimkan menggunakan format biner atau karakter ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Dalam komunikasi serial MATLAB, agar data ASCII dapat diproses *real time*, maka digunakan ASCII *encode* dan *decode* yang terdapat pada *xPC Target Library for RS232*. ASCII *encode* merupakan blok dalam *simulink* yang digunakan untuk mengubah data *bytes* menjadi karakter ASCII. Sedangkan ASCII *decode* merupakan blok *Simulink* yang digunakan untuk mengubah karakter ASCII menjadi data *bytes* yang kemudian dapat dikonversi sesuai kebutuhan.

2.6.2 LabVIEW[14]

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) merupakan *software* yang khusus digunakan untuk pemrosesan dan visualisasi data dalam bidang akuisisi data, kendali dan instrumentasi serta otomasi industri. *Software* ini pertama kali dikembangkan oleh perusahaan National Instrument (NI) pada tahun 1986. Lingkungan pemrograman LabVIEW terdiri dari dua jendela, yaitu *front panel* dan *block diagram*. Masing-masing jendela tersebut memiliki *toolbar* dan *palet* masing-masing, yaitu *toolbar front panel*, *toolbar block diagram*, *palet controls*, *palet fuctions*, *palet tool*, dan *control help*. Gambar 2.10 menunjukkan jendela *front panel* dan *block diagram* dari *software* LabVIEW .



Gambar 2. 8 Jendela *Front Panel* dan Blok Diagram LabVIEW

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Perancangan-perancangan simulasi sistem dari *coupled tank* yang terdiri atas Desain *Coupled Tank*, identifikasi sistem dan perancangan kontroler yang meliputi desain mekanik *Coupled Tank*, desain elektronik *Coupled Tank*, parameter *Coupled Tank*, model matematika hasil identifikasi kontroler MPC.

3.1 Identifikasi Sistem

Sistem yang akan dibentuk pada penelitian ini merupakan sistem pengaturan *single loop* pada *level* yang akan diterapkan pada simulator *plant coupled tank*. Untuk sistem pengaturan ini yang menjadi objektif kontrol adalah pengendalian 2 tangki dengan model decoupling. Kontroler yang digunakan adalah *Model predictive control* seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Simulator *plant coupled tank* akan dibuat pada perangkat lunak LabVIEW dengan menggunakan tambahan modeul *Control & Simulation* dan DCS. Simulator ini akan dibentuk berdasarkan pemodelan matematis dari *plant*. Pada perangkat lunak LabVIEW ini tidak hanya akan dibangun simulator dari *plant* ini saja, tetapi algoritma kontrol yang akan digunakan dibangun di LabVIEW.

3.1.1 Pemodelan *Coupled Tank* [15]

Persamaan *plant* dapat diperoleh dari persamaan kesetimbangan massa dan hukum Bernoulli. Dinamika *plant* ini dapat dimodelkan dengan persamaan diferensial sebagai berikut.

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{k_1}{A} U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} H_1(t) + \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \quad (3.1)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{k_2}{A} U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2(t) - \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \quad (3.2)$$

Setelah kedua tangki memiliki persamaan diferensial pada Persamaan (3.1) dan (3.2), kedua persamaan tersebut diubah menjadi bentuk Laplace untuk menentukan *input* dan *output* yang sesuai pada

kedua tangki. Bentuk persamaan (3.1) dan (3.2) dapat dimisalkan sebagai berikut.

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = a_{11}H_1(t) + a_{12}H_2(t) + b_1U_1(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = a_{21}H_1(t) + a_{22}H_2(t) + b_2U_2(t) \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Berdasarkan persamaan pada Persamaan (3.5), kita dapat menyimpulkan variabel-variabel sebagai berikut:

$$a_{11} = -\frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} - \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|\bar{h}_2 - \bar{h}_1|}}$$

$$a_{12} = \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|\bar{h}_2 - \bar{h}_1|}}$$

$$b_1 = \frac{k_1}{A}$$

$$a_{21} = \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|\bar{h}_2 - \bar{h}_1|}}$$

$$a_{22} = -\frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2 - \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|\bar{h}_2 - \bar{h}_1|}}$$

$$b_2 = \frac{k_2}{A}$$

Dengan persamaan Laplace sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu \\ &\downarrow \end{aligned}$$

$$SX(s) = AX(s) + BU(s)$$

$$(SI - A)X(s) = BU(s)$$

$$X(s) = (SI - A)^{-1}BU(s) \quad (3.6)$$

Substitusi persamaan A dan persamaan B menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned} X(s) &= \left[S \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \right]^{-1} \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} U(s) \\ &= \begin{pmatrix} s - a_{11} & s - a_{12} \\ s - a_{21} & s - a_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} U(s) \\ &= \frac{\begin{bmatrix} s - a_{22} & a_{21} \\ a_{12} & s - a_{11} \end{bmatrix}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} U(s) \quad (3.7) \end{aligned}$$

Bentuk persamaan *transfer function*-nya ditunjukkan pada Persamaan (3.8).

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{s - a_{22}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} & \frac{a_{21}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \\ \frac{a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} & \frac{s - a_{11}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} U(s) \quad (3.8) \end{aligned}$$

3.1.2 *Transfer Function*

Bentuk *transfer function Coupled Tank* didapat dari hasil identifikasi sistem sebelumnya, yaitu:

$$\begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \left(s + \frac{T_x + T_2}{T_2 T_x} \right)}{s^2 + \frac{(T_1 T_x + T_2 T_x + 2 T_1 T_2)}{T_1 T_2 T_x} s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (3.10)$$

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \left(\frac{1}{T_x} \right)}{s^2 + \frac{(T_1 T_x + T_2 T_x + 2 T_1 T_2)}{T_1 T_2 T_x} s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (3.11)$$

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \left(\frac{1}{T_x} \right)}{s^2 + \frac{(T_1 T_x + T_2 T_x + 2 T_1 T_2)}{T_1 T_2 T_x} s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (3.12)$$

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \left(s + \frac{T_x + T_1}{T_1 T_x} \right)}{s^2 + \frac{(T_1 T_x + T_2 T_x + 2 T_1 T_2)}{T_1 T_2 T_x} s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (3.13)$$

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a} \sqrt{\frac{2\bar{h}_1}{g}}, T_2 = \frac{A}{\beta_2 a} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}}, T_1 = \frac{A}{\beta_1 a} \sqrt{\frac{2|\bar{h}_1 - \bar{h}_2|}{g}} \quad (3.14)$$

Lalu ditentukan parameter dan titik kerja untuk *plant* yang ditunjukkan pada tabel sebagai berikut. [10]

Tabel 3. 1 Parameter Sistem

$A \text{ (cm}^2\text{)}$	66,25
$a \text{ (cm}^2\text{)}$	0,1963
β_1	0,35903
β_2	0,45848
β_x	0,38705

Tabel 3. 2 Titik Kerja *Plant*

$u_1 \text{ (V)}$	2,5
$u_2 \text{ (V)}$	2
$\bar{h}_1 \text{ (x 10\% Range)}$	2,749
$\bar{h}_2 \text{ (x 10\% Range)}$	3,262
$k_1 \text{ (cm}^3\text{/V.s)}$	2,88
$k_2 \text{ (cm}^3\text{/V.s)}$	2,588

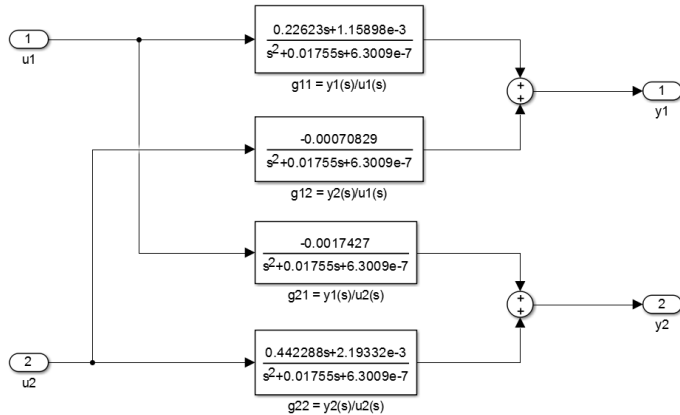
Dengan masukannya berupa tegangan ke pompa yang ditunjukkan dalam lambang $u_1(t)$, $u_2(t)$. Keluarannya berupa ketinggian air pada tangki 1 dan 2 yang ditunjukkan dalam $h_1(t)$, $h_2(t)$.

$$G_{11}(s) = \frac{0,22623s+1,15898e-3}{s^2+0,01755s+6,009e-7} \quad (3.15)$$

$$G_{12}(s) = \frac{-0,00070829}{s^2+0,01755s+6,3009e-7} \quad (3.16)$$

$$G_{21}(s) = \frac{-0,0017427}{s^2+0,01755s+6,3009e-7} \quad (3.17)$$

$$G_{22}(s) = \frac{0,442288s+2,19332e-3}{s^2+0,01755s+6,3009e-7} \quad (3.18)$$



Gambar 3. 1 Konfigurasi MIMO

Gambar 3.1 merupakan bentuk konfigurasi MIMO untuk *transfer function* dari *Coupled Tank Plant*. Persamaan (3.15) sampai Persamaan (3.18) merupakan *transfer function Coupled Tank Plant* hasil identifikasi sistem.

3.2 Desain Dekopling

Pada sistem *Coupled Tank Plant* ini, masing-masing *input* mempengaruhi kedua *output*. Oleh karena itu, dirancang suatu metode dekopling untuk menghilangkan pengaruh interaksi *input-output*.

Dekoupling yang akan dirancang ini, dapat meminimalisir gangguan pada *plant*, ketika salah satu *input* diberi gangguan sehingga membuat *plant* menjadi lebih stabil.

Persamaan dekoupling didapat dari memasukkan nilai matriks *transfer function Coupled Tank Plant* yang telah didapatkan dari Persamaan (3.19). Persamaan matriks didapat dari penghitungan sebagai berikut:

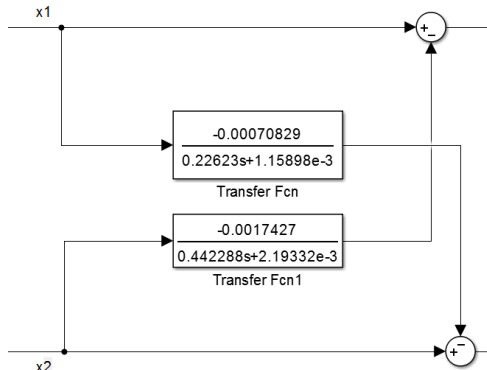
$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-G_{12}(s)}{G_{11}} \\ \frac{-G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Transfer function yang didapat adalah sebagai berikut:

$$D_{12}(s) = \frac{-0,00070829}{0,22623s+1,15898e-3} \quad (3.20)$$

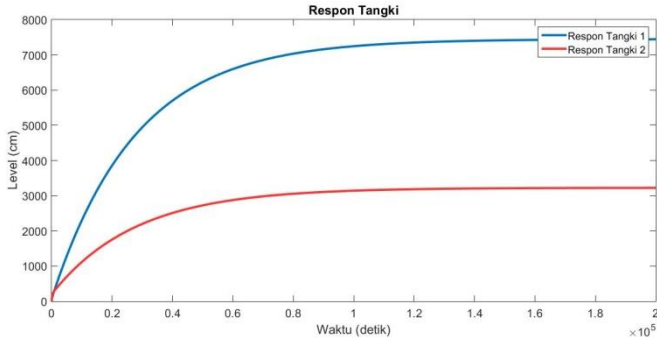
$$D_{21}(s) = \frac{-0,0017427}{0,442288s+2,19332e-3} \quad (3.21)$$

Gambar dekoupling sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dengan adanya metode dekoupling pada sistem, maka *output* Y_1 hanya dipengaruhi oleh *input* u_1 . Sedangkan *output* Y_2 dipengaruhi oleh *input* u_2



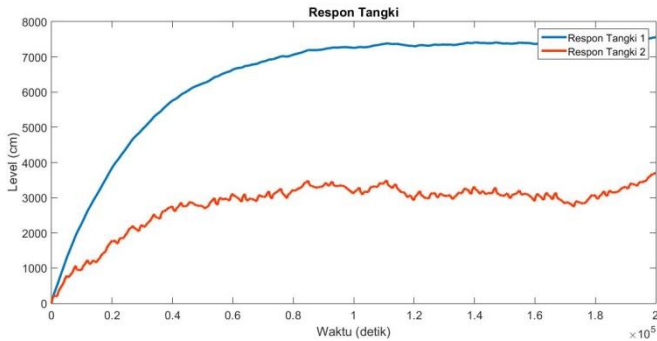
Gambar 3. 2 Bentuk Dekoupling *Plant*

Respon sistem setelah dipasang Dekoupling ditunjukkan pada gambar berikut



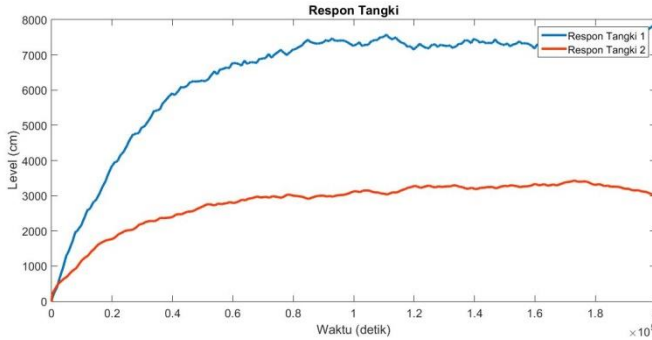
Gambar 3. 3 Respon Dekopling

Setelah diperoleh nilai dekopler D_{12} dan D_{21} , maka perlu diuji apakah dekopler sudah dapat menghilangkan interaksi antar *input*. Pengujian dekopling dilakukan dengan memberi sinyal random pada *input* u_2 . Hasil respon pada sistem saat *input* u_2 diberi gangguan ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Respon Dekopling dengan Noise

Dari Gambar 3.4 terlihat apabila gangguan diberikan pada sistem *level*, maka *output* yang terpengaruh hanya pada tangki 2, sedangkan pada tangki 1 tidak terpengaruh dari gangguan. Pada pengujian dekopling berikutnya, gangguan diberikan pada tangki 1, *output* pada tangki 2 terpengaruh sedangkan *output* tangki 1 tidak. Hasil respon pada sistem tangki 2 ikut terpengaruh. Hal itu ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Respon *Dekopling* dengan *Noise*

Dari Gambar 3.5 terlihat apabila gangguan diberikan pada *input* u_1 , sistem mengalami perubahan.

3.3 Perancangan Kontroler

Perancangan desain kontroler MPC ini dimaksudkan untuk mengontrol masukan cairan pada tangki agar sesuai dengan ketinggian yang diinginkan dalam kondisi yang diinginkan. Dalam *Coupled Tank Plant* ini, dibutuhkan respon yang cepat untuk mengisi tangki.

3.3.1 Langkah Pengerjaan MPC [16]

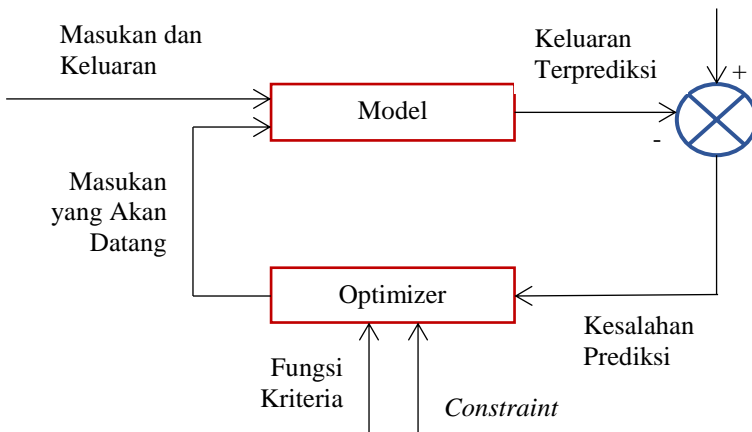
Struktur dasar dari pengendali MPC dibagi menjadi dua bagian, yaitu Model dan Optimizer. Pada Optimizer terdiri dari fungsi kriteria dan *constraint* lalu menjadi masukan pada model sebagai masukan yang akan datang. Setelah itu keluarannya berupa keluaran yang telah terprediksi dan *feed forward* pada Optimizer sebagai kesalahan prediksi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.5

Metode semua jenis pengendali yang termasuk ke dalam kategori MPC dapat dikenali oleh strategi berikut:

- Keluaran proses yang akan datang untuk rentang *horizon* H_p yang ditentukan yang dinamakan sebagai *prediction horizon*, diprediksi pada setiap waktu pencuplikan dengan menggunakan model proses. Keluaran proses terprediksi ini $y(k + i|k)$ untuk $i = 1 \dots H_p$ bergantung pada nilai masukan dan keluaran lampau dan kepada sinyal kendali yang akan datang $u(k + i|k)$, $i = 0 \dots H_p - 1$, yang akan digunakan sistem dan harus dihitung.
- Serangkaian sinyal kendali dihitung dengan mengoptimasi suatu fungsi kriteria yang ditetapkan sebelumnya, dengan tujuan untuk

menjaga proses sedekat mungkin terhadap trayektori acuan $r(k + i)$. Fungsi kriteria tersebut umumnya berupa suatu fungsi kuadrat dari kesalahan antara sinyal keluaran terprediksi dengan trayektori acuan. Solusi eksplisit dapat diperoleh jika fungsi kriteria adalah kuadrat, model linear, dan tidak ada *constraints*, jika tidak, optimasi iteratif harus digunakan untuk memecahkannya.

- c. Sinyal kendali $u(k|k)$ dikirim ke proses, sedangkan sinyal kendali terprediksi berikutnya dibuang karena pada pencuplikan berikutnya $y(k + 1)$ sudah diketahui nilainya. Maka langkah pertama diulang dengan nilai keluaran proses yang baru dan semua prosedur perhitungan yang diperlukan diperbaiki. Sinyal kendali yang baru $u(k + 1|k + 1)$ (nilainya berbeda dengan $u(k + 1|k)$) dihitung dengan menggunakan konsep *receding horizon*.



Gambar 3. 6 Model Kontroler

3.3.2 Desain Kontroler MPC

Setelah fungsi alih dari sistem telah didapatkan, langkah selanjutnya adalah merancang kontroler untuk sistem. Kontroler digunakan untuk mengembalikan respon ke nilai setpoint yang diinginkan meskipun *plant* diberi beban. Tahapan desain kontroler ini meliputi perancangan fungsi alih pada model *state-space*, desain *augmented model*, perancangan *state estimator* menggunakan observer dan penentuan parameter kontroler *Model predictive control* (MPC).

3.3.2.1 *Perencanaan Model State Space*

Kontroler MPC merupakan kontroler berbasis model. Artinya, diperlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kontroler yang telah didesain dapat bekerja secara optimal. Fungsi alih yang digunakan merupakan fungsi alih pada tangki 1 dan 2. *Coupled Tank Plant* yang telah dipasang dekopling. Fungsi alih ini tidak bisa langsung digunakan untuk merancang kontroler MPC, melainkan harus diubah terlebih dahulu ke dalam bentuk *state-space*.

- a. Perencanaan Model *State Space* pada Tangki 1
Fungsi alih tangki 1 adalah sebagai berikut:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} = \frac{0,2262 z + 0,001159}{z^2 + 0,0175 z + 6,301e-7} \quad (3.22)$$

Berdasarkan fungsi alih pada Persamaan (3.22), kita dapat menyimpulkan variabel-variabel sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,0175 \\ a_2 &= 6,301e-7 \\ b_0 &= 0 \\ b_1 &= 0,2262 \\ b_2 &= 0,001159 \end{aligned}$$

Bentuk *state-space* yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah bentuk *controllable canonical form*. Bentuk *state-space* untuk orde 2 tersebut mempunyai struktur sebagai berikut [8]:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.23)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Berdasarkan bentuk di atas, maka model *state-space* dari Persamaan (3.22) dapat disimpulkan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6,301e-7 & -0.0175 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.25)$$

$$y(k) = [0,001159 \quad 0,2262] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

- b. Perencanaan Model *State Space* pada Tangki 2
Fungsi alih tangki 2 adalah sebagai berikut:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} = \frac{0,442288 z + 2,19332e-3}{z^2 + 0,01755 z + 6,3009e-7} \quad (3.27)$$

Berdasarkan fungsi alih pada Persamaan (3.27), kita dapat menyimpulkan variabel-variabel sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,01755 \\ a_2 &= 6,3009e-7 \\ b_0 &= 0 \\ b_1 &= 0,442288 \\ b_2 &= 2,19332e-3 \end{aligned}$$

Bentuk *state-space* yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah bentuk *controllable canonical form*. Bentuk *state-space* untuk orde 2 tersebut mempunyai struktur sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.28)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Berdasarkan bentuk di atas, maka model *state-space* dari Persamaan (3.27) dapat disimpulkan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6,301e-7 & -0,0175 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.30)$$

$$y(k) = [2,19332 \quad 0,442288] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.3.2.2 Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah dengan cara mengubah bentuk *state space* ke dalam bentuk *augmented model* dari model yang sudah didiskritisasi.

- a. Desain *Augmented model* untuk Tangki 1

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6,301e-7 & -0,0175 \end{bmatrix}}^{A_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}^{B_m} u(k) \quad (3.32)$$

$$y(k) = \overbrace{[0,001159 \quad 0,2262]}^{C_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Berdasarkan Persamaan (3.32) kita dapat mengubah bentuk *state-space* di atas menjadi bentuk *augmented model*.

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.34)$$

$$y(k) = \overbrace{[0_m \quad 1]}^C \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Sehingga, *Augmented model* dari tangki 1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -6,301e-7 & -0,0175 & 0 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} \\ &+ \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,2262 \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^C \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Matriks A, B, C yang merupakan bentuk *augmented model* akan digunakan selanjutnya dalam merancang sebuah kontroler MPC.

b. Desain *Augmented model* untuk Tangki 2

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6,301e-7 & -0,0175 \end{bmatrix}}^{A_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}^{B_m} u(k) \quad (3.38)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0,0022 & 0,4423 \end{bmatrix}}^{C_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Berdasarkan Persamaan (3.40) dan (3.41) kita dapat mengubah bentuk *state-space* di atas menjadi bentuk *augmented model*.

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.40)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0_m & 1 \end{bmatrix}}^C \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Sehingga, *Augmented model* dari tangki 2 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -6,301e-7 & -0,0175 & 0 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} \\ &+ \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,442288 \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^C \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Matriks A, B, C yang merupakan bentuk *augmented model* akan digunakan selanjutnya dalam merancang sebuah kontroler MPC.

3.3.2.3 Penentuan Parameter dan Gain Kontroler MPC

Langkah selanjutnya dalam perancangan kontroler MPC adalah menentukan parameter dari kontroler MPC. Parameter yang dimaksud adalah *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c), dan *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w).

a. Penentuan Parameter dan *Gain* Kontroler MPC pada Tangki 1

Pada perancangan kontroler MPC pada tangki 1, akan digunakan parameter *prediction horizon* sebesar 10 langkah, *control horizon* senilai 1 langkah, dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan Persamaan (3.42) dan (3.43), nilai *output* terprediksi dan variabel kontrol yang akan datag dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Y = F x(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.44)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Setelah nilai parameter kontroler ditentukan, maka kita dapat menentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai matriks *augmented model* ke Persamaan (3.46). Hasil yang didapatkan dapat dilihat pada persamaan ini.

$$F = \begin{bmatrix} -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \\ -0,0000 & -0,0028 & 1 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 0,2262 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \\ 0,2234 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapatkan matriks F dan Φ , parameter selanjutnya yang akan dicari adalah *gain* dari kontroler MPC. *Gain* tersebut adalah KMPC dan K_y . Untuk mencari nilai KMPC, terlebih dahulu kita harus mencari nilai dari matriks Y sebagai berikut:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.47)$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut.

$$Y = \begin{bmatrix} -0,0000 & -0,0088 & 3,1937 \\ -0,0000 & -0,0017 & 0,6136 \end{bmatrix}$$

Nilai *Gain* KMPC merupakan baris pertama dari matriks Y . Oleh karena itu, nilai *gain* KMPC dapat kita simpulkan sebagai matriks berikut.

$$K_{MPC} = [-0,0000 \quad -0,0088 \quad 3,1937]$$

Setelah *gain* KMPC didapatkan, langkah selanjutnya adalah mencari *gain* K_y . Penguatan atau *gain* ini dapat dihitung dari nilai matriks Z sebagai berikut.

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.48)$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut.

$$Z = \begin{bmatrix} 3,1937 \\ 0,6136 \end{bmatrix}$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z . Berdasarkan matriks di atas, dapat diambil bahwa nilai K_y mempunyai nilai:

$$K_y = 3,1937$$

b. Penentuan Parameter dan *Gain* Kontroler MPC pada Tangki 2

Pada perancangan kontroler MPC pada tangki 2, akan digunakan parameter *prediction* horizon sebesar 10 langkah, *control* horizon senilai 1 langkah, dan tuning parameter indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan Persamaan (3.42) dan (3.43), nilai *output* terprediksi dan variabel kontrol yang akan datag dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Y = F x(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.49)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Setelah nilai parameter kontroler ditentukan, maka kita dapat menentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai matriks *augmented model* ke Persamaan (3.51). Hasil yang didapatkan dapat dilihat pada persamaan ini.

$$F = \begin{bmatrix} -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0054 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0054 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \\ -0,0000 & -0,0055 & 1 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 0,4423 \\ 0,4367 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \\ 0,4368 \end{bmatrix}$$

Setelah mendapatkan matriks F dan Φ , parameter selanjutnya yang akan dicari adalah *gain* dari kontroler MPC. *Gain* tersebut adalah K_{MPC} dan K_y . Untuk mencari nilai K_{MPC} , terlebih dahulu kita harus mencari nilai dari matriks Y sebagai berikut:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.52)$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut.

$$Y = \begin{bmatrix} -0,0000 & -0,0113 & 2,0699 \\ -0,0000 & -0,0033 & 0,6107 \end{bmatrix}$$

Nilai *Gain* KMPC merupakan baris pertama dari matriks Y . Oleh karena itu, nilai *gain* KMPC dapat kita simpulkan sebagai matriks berikut.

$$K_{MPC} = [-0,0000 \quad -0,0113 \quad 2,0699]$$

Setelah *gain* KMPC didapatkan, langkah selanjutnya adalah mencari *gain* K_y . Penguatan atau *gain* ini dapat dihitung dari nilai matriks Z sebagai berikut.

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.53)$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut.

$$Z = \begin{bmatrix} 2,0699 \\ 0,6107 \end{bmatrix}$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z . Berdasarkan matriks di atas, dapat diambil bahwa nilai K_y mempunyai nilai:

$$K_y = 2,0699$$

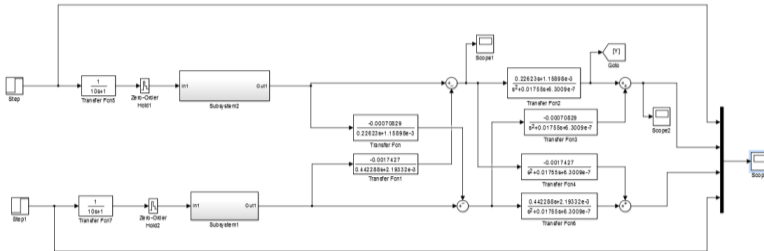
3.4 Perancangan Simulasi

Perancangan simulasi ini dimaksudkan untuk memberi gambaran respon sistem. Perancangan ini dibagi menjadi 2, yaitu perancangan respon menggunakan MATLAB dan perancangan *interface* dengan menggunakan LabVIEW.

3.4.1 MATLAB

Hasil perancangan *Coupled Tank*, konfigurasi dekopling, dan kontroler disimulasikan pada simulink MATLAB. Pada simulink

terdapat blok diagram *plant Coupled Tank*. *Coupled Tank* diberi dekopling agar *output pressure* tidak dipengaruhi oleh *input*. Terdapat operating point pada *plant*, dimana sinyal kontrol berjalan pada titik kerja yang telah ditentukan. Untuk membuat respon *plant* yang lebih cepat dan lebih stabil, diberi kontroler MPC pada perancangan sistemnya.



Gambar 3. 7 Bentuk Diagram Blok *Plant*

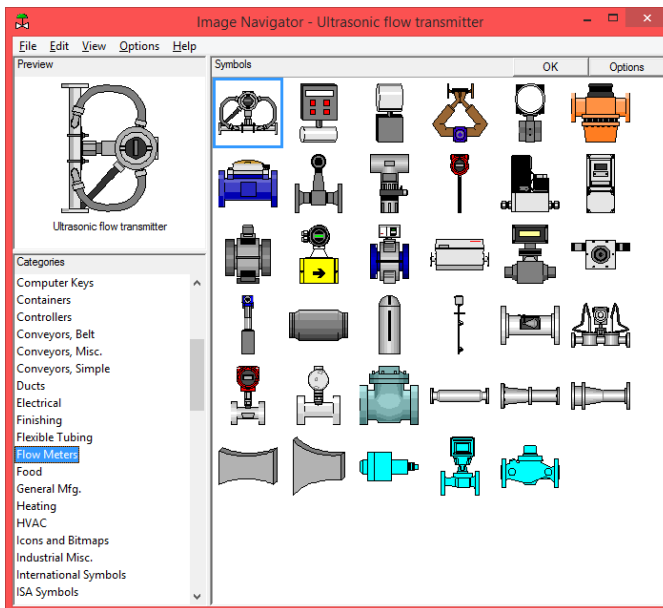
3.4.2 LabVIEW

Human Machine Interface (HMI) merupakan antarmuka antara operator dengan *plant* yang dikendalikan. HMI ini berfungsi untuk memudahkan operator untuk berinteraksi dengan proses. Pada umumnya tampilan HMI dibuat dengan *screen* terpisah-pisah dengan fungsi masing-masing, mulai dari fungsi *monitoring*, *controlling*, *reporting* dan *alarm message*. Banyak produk yang dapat digunakan untuk membuat HMI ini, contohnya Wonderware, WinCC, RSView, LabVIEW dan lain sebagainya.

Pada perancangan HMI *coupled tank* ini digunakan perangkat lunak LabVIEW. Keuntungan dari perangkat lunak LabVIEW ini pembuatan HMI dan program yang akan disambungkan ke HMI sudah dalam satu program. Perangkat lunak LabVIEW ini terdiri atas dua bagian yaitu *front panel* dan *block diagram*. *Front panel* ini berfungsi sebagai UI (*User Interface*) / HMI, sedangkan *block diagram* merupakan tempat dimana program LabVIEW dibuat.

Perangkat lunak LabVIEW standar sudah menyediakan gambar seperti *knob*, *led*, *grap chart*, *slider* untuk pembuatan HMI pada front panel, tetapi untuk gambar tangki, sensor, pipa, pompa, dan perangkat aktuatur dan instrumen lainnya belum tersedia, sehingga diperlukan menambah *add on DCS Module* pada perangkat lunak LabVIEW ini. HMI yang akan dibuat ini merepresentasikan dari *plant coupled tanks*.

Penggambaran dari *plant coupled tanks* ini terdiri atas dua tangki vertikal dan satu tangki penyimpanan, untuk sensor dan aktuator yang ditampilkan adalah satu sensor *flow* dan tiga *pneumatic control valve*. Pemilihan gambar dari tangki, sensor dan aktuator melalui menu *image navigator* pada DSC Module. Menu ini terdapat pada *Tools* → *DSC Module* → *Image Navigator*. Pada menu *image navigator* seperti pada Gambar 3.5 terdapat berbagai macam gambar dari mulai boiler, sensor, tangki, pompa, konveyor dan gambar lainnya yang banyak digunakan di HMI.

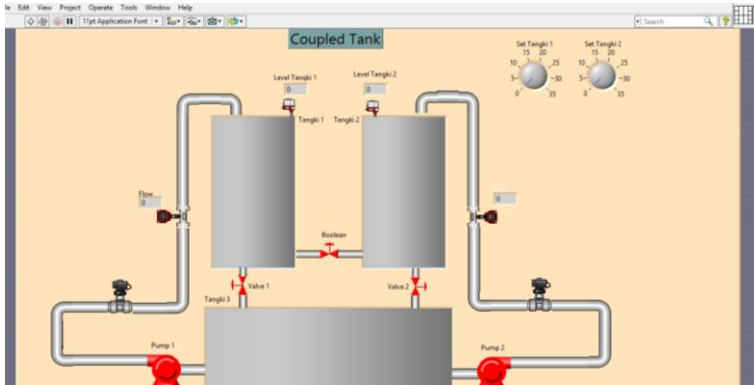


Gambar 3. 8 *Image Navigator* pada LabVIEW

HMI yang dibuat menampilkan perubahan *set point* tegangan yang dapat diubah melalui *icon knob* dan grafik perubahan respon dari *plant*. Knob diberikan nilai numerik indikator untuk menentukan nilai *set point*. Pada tampilan HMI, *valve* akan berwarna merah ketika aktif dan berwarna hijau ketika sistem tidak berjalan. Pada kedua tangki diberi indikator bar di atas tangki sebagai pengganti indikator numerik untuk menunjukkan *level* fluida pada tangki. Pada sensor, untuk mengetahui jumlah *flow* yang mengalir pada pipa dipasang indikator

numerik di kedua pipa. HMI yang didesain ditunjukkan pada Gambar 3.9

Untuk model matematis dari *plant coupled tank* yang dihubungkan dengan HMI ini dibuat di LabVIEW dengan menggunakan *add on Control and Simulation Module*.



Gambar 3. 9 HMI *Coupled Tank Plant*

Pada *block diagram* LabVIEW dipilih dulu *Control Simulation Loop* untuk dapat memasukkan blok fungsi dari fungsi alih dan kontroler yang digunakan. Blok fungsi alih dan kontroler yang digunakan dapat dipilih pada menu *control and simulation* modul pada bagian *simulation*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

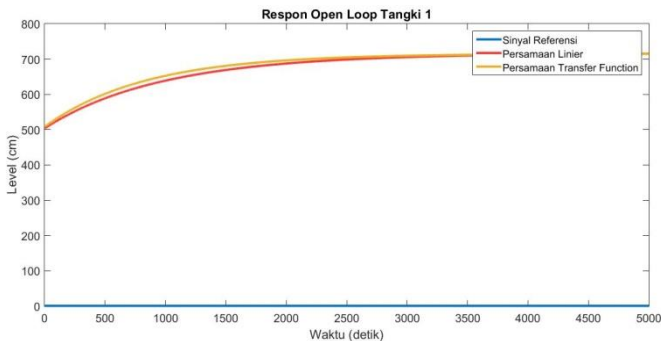
PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini berisi tentang hasil simulasi dan implementasi serta *analisis* dari perancangan yang sudah dilakukan pada Bab III. Pengujian akan dilakukan dengan kontroler MPC untuk *one loop* sistem. Pengujian kontroler juga dengan memberikan gangguan pada sistem. Kemudian dilakukan analisa terhadap data hasil simulasi yang terbagi menjadi simulasi sistem, uji beban dan tampilan HMI.

4.1 Simulasi *Open Loop* Sistem

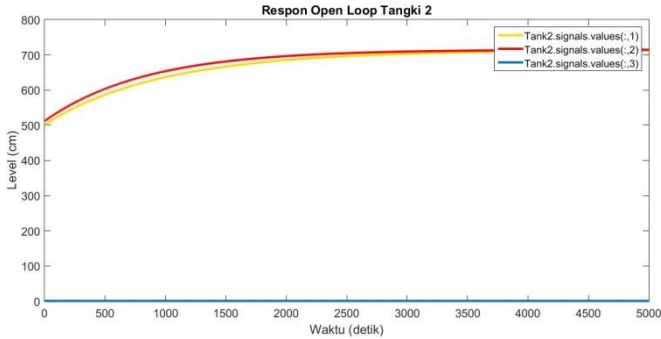
Simulasi *open loop* sistem dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari *Coupled Tank* sebelum diberikan kontroler. Pengujian dilakukan dengan memberikan nilai akhir sinyal step 1 pada *input* 1 yang mewakili tangki 1 dan *input* 2 yang mewakili tangki 2. Hasil respon *plant* dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Pengujian ini dilakukan untuk melihat hubungan antara *input* yang berupa tegangan dan *output* berupa ketinggian *level* air pada tangki. Berikut merupakan respon *open loop* untuk tangki 1 dan tangki 2



Gambar 4. 1 Respon *Open Loop* Tangki 1

Dari data step yang didapatkan, untuk respon pada tangki 1 memiliki *Rise Time* pada detik ke 428. Bentuk respon yang didapatkan yaitu respon *overdamped*, respon tidak mengalami *overshoot* namun untuk menuju hasil yang diharapkan respon membutuhkan waktu yang sangat lama. Respon masih memiliki kesalahan untuk *steady-state* yang sangat besar, yaitu sebesar 615,88. Kontroler diperlukan untuk menghilangkan kesalahan pada respon *open loop*.



Gambar 4. 2 Respon *Open Loop* Tangki 2

Untuk respon pada tangki 2, Dari data step yang didapatkan, untuk respon pada tangki 1 memiliki *Rise Time* pada detik ke 450. Bentuk respon yang didapatkan yaitu respon *overdamped*, respon tidak mengalami *overshoot* namun untuk menuju hasil yang diharapkan respon membutuhkan waktu yang sangat lama. Respon masih memiliki kesalahan untuk *steady-state* yang sangat besar, yaitu sebesar 615,88. Kontroler diperlukan untuk menghilangkan kesalahan pada respon *open loop*.

4.2 Simulasi Pengujian dengan Kontroler MPC

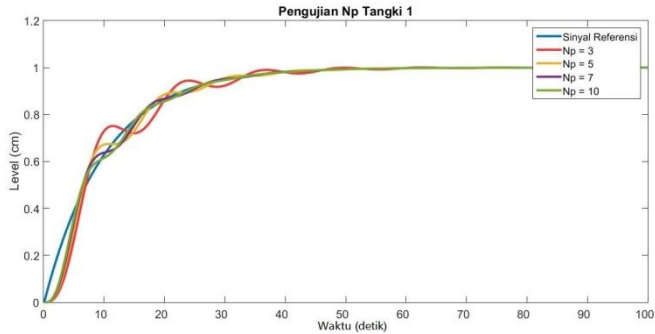
Kontroler pada sistem yang telah dirancang akan disimulasikan terlebih dahulu pada masing-masing tangki untuk melihat respon yang sesuai dengan parameter tangki. Pengujian akan dilakukan dengan berbagai variasi pada kontroler MPC yang dipasang untuk mendapatkan respon yang diinginkan.

Berikut ini merupakan pengujian untuk tangki tangki 1 dengan variasi *Prediction Horizon* dan *Control Horizon*. Pengujian dengan variasi set *Prediction Horizon* tersebut dan *Control Horizon* dilakukan untuk mengetahui apakah respon kontroler MPC tersebut dapat mengikuti sinyal referensi yang diberikan.

4.2.1 Blok Diagram *Simulink*

Secara garis besar, diagram blok simulasi sistem terdiri dari *state-space* sistem, penguatan atau *gain* MPC dan subsistem *observer*. Seperti terlihat pada Gambar 4.3, terdapat blok diagram untuk *state-space* yang terdiri dari blok gain A, B, C. Selain itu terdapat blok penguatan pada

No.	Np	Nc	Kmpc	Ky
2.	5	2	[-0,0000 -0,0022 0,7971]	0,7971
3.	7	2	[-0,0000 -0,0027 0,9808]	0,9808
4.	10	2	[-0,0000 -0,0033 1,1849]	1,1849



Gambar 4. 5 Uji Nilai Np Tangki 1

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin besar nilai dari Np yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin kecil nilai Np, respon semakin lambat pada waktu *settling time* menuju kondisi *steady state*.

Nilai Np yang dipilih adalah 10, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 2 Analisis Nilai Np Tangki 1

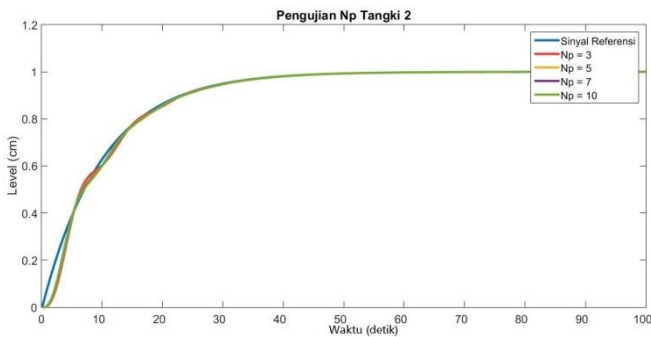
	Np = 3	Np = 5	Np = 7	Np = 10
<i>Peak Time</i> (s)	78,250	80,400	81,0667	82,7333
<i>Rise Time</i> (s)	19,550	19,500	20,1500	20,8500
<i>Settling Time</i> (s)	26,1500	26,700	26,7500	27,400
<i>Overshoot</i>	0,08706	0,0113	0,0093	0,0079
<i>Ess</i>	1,0739e-04	7,8268e-5	6,5814e-5	2,0612e-9

B. Tangki 2

Simulasi pengujian kontroler MPC pada tangki 2 dengan variasi nilai N_p yang akan menghasilkan sinyal keluaran yang diprediksi akan berbeda karena banyaknya kondisi *state*. Variasi nilai N_p ditunjukkan pada Tabel 4.1, dengan nilai N_c yang tetap. Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon hasil dari simulasi dengan variasi N_p dengan *reference* sinyal step.

Tabel 4. 3 Variasi Nilai N_p Tangki 2

No.	N_p	N_c	Kmpc	K_y
1.	3	2	[-0,0000 -0,0040 0,7291]	0,7291
2.	5	2	[-0,0000 -0,0048 0,8791]	0,8791
3.	7	2	[-0,0000 -0,0053 0,9614]	0,9614
4.	10	2	[-0,0000 -0,0057 1,0329]	1,0329



Gambar 4. 6 Uji Nilai N_p Tangki 2

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin besar nilai dari N_p yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin kecil nilai N_p , respon semakin lambat pada waktu *settling time* menuju kondisi *steady state*.

Nilai N_p yang dipilih adalah 10, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 4 Analisis Nilai N_p Tangki 2

	$N_p = 3$	$N_p = 5$	$N_p = 7$	$N_p = 10$
<i>Peak Time</i> (s)	84,0667	85,0667	85,400	85,7333
<i>Rise Time</i> (s)	20,700	19,700	20,750	20,750
<i>Settling Time</i> (s)	27,2500	27,300	27,200	28,250
<i>Overshoot</i>	0,0068	0,0059	0,0055	0,0052
<i>Ess</i>	4,9577e-5	4,3162e-5	4,0492e-5	3,8518e-5

4.2.2.2 Pengujian Parameter N_c

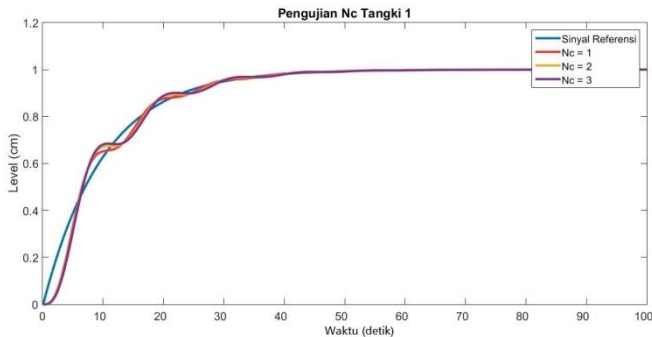
Setelah menentukan pengaruh dari *prediction horizon* pada srespon sistem, variabel selanjutnya yang akan diuji adalah pengaruh dari *control horizon* atau N_c pada respon sistem. Pada pengujian *control horizon* ini, nilai *prediction horizon* dan *tuning parameter* akan dijadikan nilai tetap, untuk melihat pengaruh dari perubahan nilai *control horizon* pada sistem.

A. Tangki 1

Simulasi pengujian kontroler MPC pada tangki 1 dengan variasi nilai N_c yang akan menghasilkan sinyal keluaran yang diprediksi akan berbeda karena banyaknya kondisi *state*. Variasi nilai N_c ditunjukkan pada Tabel 4.1, dengan nilai N_p yang tetap. Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon hasil dari simulasi dengan variasi N_c dengan *reference* sinyal step.

Tabel 4. 5 Variasi Nilai N_c Tangki 1

No.	N_c	N_p	K_{mpc}	K_y
1.	1	5	[-0,0000 -0,0025 0,8953]	0,8953
2.	2	5	[-0,0000 -0,0022 0,7971]	0,7971
3.	3	5	[-0,0000 -0,0021 0,7547]	0,7547



Gambar 4. 7 Uji Nilai Nc Tangki 1

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin kecil nilai dari Nc yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin besar nilai Nc, respon semakin cepat pada waktu *settling time* menuju kondisi *steady state*.

Nilai Nc yang dipilih adalah 1, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 6 Analisis Nilai Nc Tangki 1

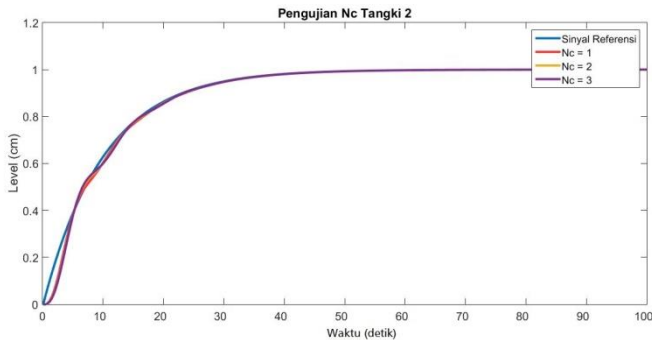
	Nc = 1	Nc = 2	Nc = 3
<i>Peak Time</i> (s)	82,400	80,400	75,0667
<i>Rise Time</i> (s)	21,350	21,500	21,700
<i>Settling Time</i> (s)	27,550	26,700	26,800
<i>Overshoot</i>	0,0101	0,0113	0,0120
<i>Ess</i>	7,0973e-5	7,8268e-5	8,2002e-5

B. Tangki 2

Simulasi pengujian kontroler MPC pada tangki 2 dengan variasi nilai Nc yang akan menghasilkan sinyal keluaran yang diprediksi akan berbeda karena banyaknya kondisi *state*. Variasi nilai Nc ditunjukkan pada Tabel 4.1, dengan nilai Np yang tetap. Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon hasil dari simulasi dengan variasi Nc dengan *reference* sinyal step.

Tabel 4. 7 Variasi Nilai Nc Tangki 2

No.	Nc	Np	Kmpc	Ky
1.	1	5	[-0,0000 -0,0061 1,1178]	1,1178
2.	2	5	[-0,0000 -0,0048 0,8791]	0,8791
3.	3	5	[-0,0000 -0,0044 0,8096]	0,8096



Gambar 4. 8 Uji Nilai Nc Tangki 2

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin kecil nilai dari Nc yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin besar nilai Nc, respon semakin cepat pada waktu *settling time* menuju kondisi *steady state*.

Nilai NC yang dipilih adalah 1, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 8 Analisis Nilai Nc Tangki 2

	Nc = 1	Nc = 2	Nc = 3
<i>Peak Time</i> (s)	86,0667	85,0667	84,400
<i>Rise Time</i> (s)	21,800	21,700	21,700
<i>Settling Time</i> (s)	27,250	27,200	27,200
<i>Overshoot</i>	0,0049	0,0059	0,0063
<i>Ess</i>	3,6503e-5	4,3162e-5	4,5839e-5

4.2.2.3 Pengujian nilai Tuning Parameter

Variabel terakhir yang diuji pengaruhnya pada sistem adalah nilai *tuning parameter* r_w pada indeks performansi J . Nilai dari *tuning parameter* ini mempunyai kemiripan dengan matriks pembobot Q dan R pada kontroler LQR. Sama seperti prosedur pengujian sebelumnya, nilai dari *prediction horizon* dan *control horizon* akan dibuat konstan untuk mengetahui pengaruh dari *tuning parameter* pada indeks performansi dan sinyal kontrolnya.

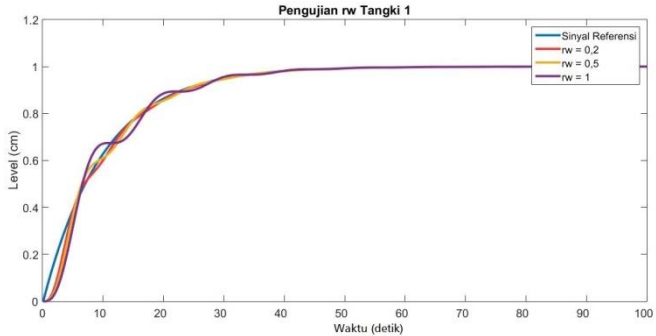
A. Tangki 1

Simulasi pengujian kontroler MPC pada tangki 1 dengan variasi nilai r_w yang akan menghasilkan sinyal keluaran yang diprediksi akan berbeda karena banyaknya kondisi *state*. Variasi nilai r_w ditunjukkan pada Tabel 4.1, dengan nilai N_p dan N_c yang tetap. Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon hasil dari simulasi dengan variasi r_w dengan *reference* sinyal step.

Tabel 4. 9 Variasi Nilai r_w Tangki 1

No.	r_w	N_p	N_c	K_{mpc}	K_y
1.	0.2	5	2	[-0,0000 -0,0053 1,9158]	1,9158
2.	0.5	5	2	[-0,0000 -0,0034 1,2453]	1,2453
3.	1	5	2	[-0,0000 -0,0022 0,7971]	0,7971

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin kecil nilai dari r_w yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin besar nilai N_c , respon semakin cepat pada waktu peak menuju kondisi *steady state*.



Gambar 4. 9 Uji Nilai rw Tangki 1

Nilai rw yang dipilih adalah 0,2, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 10 Analisis Nilai rw Tangki 1

	$Rw = 0,2$	$Rw = 0,5$	$Rw = 1$
<i>Peak Time</i> (s)	85,400	83,0667	80,400
<i>Rise Time</i> (s)	22,750	22,800	22,113
<i>Settling Time</i> (s)	28,200	28,350	28,700
<i>Overshoot</i>	0,0054	0,0076	2,0621e-7
<i>Ess</i>	3,9443e-5	5,4338e-5	7,8268e-5

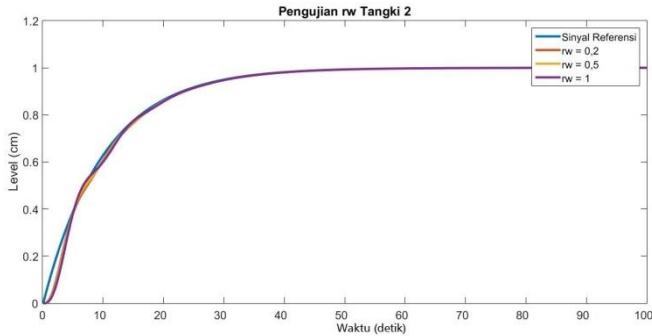
B. Tangki 2

Simulasi pengujian kontroler MPC pada tangki 1 dengan variasi nilai rw yang akan menghasilkan sinyal keluaran yang diprediksi akan berbeda karena banyaknya kondisi *state*. Variasi nilai rw ditunjukkan pada Tabel 4.1, dengan nilai N_p dan N_c yang tetap. Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon hasil dari simulasi dengan variasi rw dengan *reference* sinyal step.

Tabel 4. 11 Variasi Nilai rw Tangki 2

No.	rw	N_p	N_c	K_{mpc}
1.	0.2	5	2	[-0,0000 -0,0080 1,4518]
2.	0.5	5	2	[-0,0000 -0,0062 1,1352]

No.	rw	Np	Nc	Kmpc
3.	1	5	2	[-0,0000 -0,0048 0,8791]



Gambar 4. 10 Uji Nilai rw Tangki 2

Dari hasil didapatkan semua respon terlihat sudah dapat mengikuti bentuk respon sinyal referensi. Semakin kecil nilai dari rw yang digunakan maka nilai *overshoot* respon dari sistem akan semakin kecil. Sedangkan semakin besar nilai Nc, respon semakin cepat pada waktu peak menuju kondisi *steady state*.

Nilai rw yang dipilih adalah 0,2, dikarenakan respon mengalami osilasi paling kecil dan menuju *steady state* cukup cepat. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *peak* dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4. 12 Analisis Nilai rw Tangki 2

	Rw = 0,2	Rw = 0,5	Rw = 1
<i>Peak Time</i> (s)	87,400	86,0667	85,0667
<i>Rise Time</i> (s)	22,800	21,280	21,700
<i>Settling Time</i> (s)	28,250	27,800	28,200
<i>Overshoot</i>	0,0041	0,0049	0,0059
<i>Ess</i>	3,0861e-5	3,6127e-5	4,3162e-5

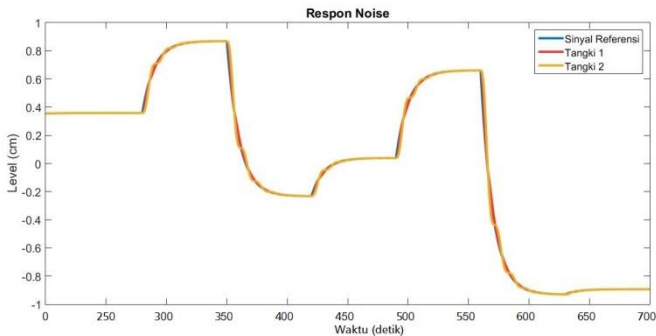
4.3 Simulasi Pengujian Kontroler MPC

Setelah mendapatkan *Prediction Horizon*, *Control Horizon*, DAN tuning parameter yang sesuai, Kontroler MPC akan dipasang pada tangki 1 dan tangki 2 untuk melihat apakah sinyal yang dibentuk mengikuti sinyal *reference*. Terlihat bahwa respon pemodelan tangki 1

dan 2 dengan menggunakan MPC berimpit dengan respon dari model yang diinginkan

Pada Gambar 4.9 dibawah adalah dimana respon *input* beban berubah untuk membuktikan bahwa kontroler MPC dapat bertahan pada nilai *setpoint* ketika diberi *disturbance random* dengan *input* yang menunjukkan *real system* bahwa beban tidak dapat terprediksi. *Input disturbance random* berubah sesuai 70 detik, ketika respon kontroler sudah mencapai *steady state* sesuai pada model yang diinginkan dengan nilai *settling* sebesar 10,2 detik namun respon asli *plant* belum mencapai *steady state*.

Nilai RMSE yang didapatkan pada tangki 1 adalah 0,0910 dan nilai RMSE yang didapatkan pada tangki 2 adalah 0,0957.

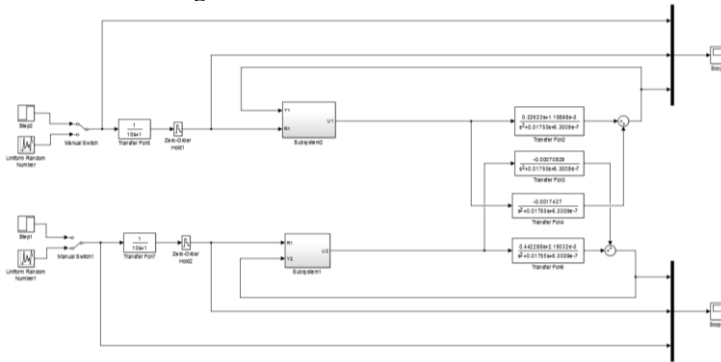


Gambar 4. 11 *Disturbance* pada Tangki 1 dan Tangki 2

4.4 Simulasi Pengujian Kontroler MPC pada Sistem tanpa Dekopling

Setelah mendapatkan *Control Horizon* dan *Prediction Horizon* yang sesuai dapat mengikuti sinyal *reference* dengan *disturbance*, Kontroler MPC akan dipasang pada sistem tangki keseluruhan.

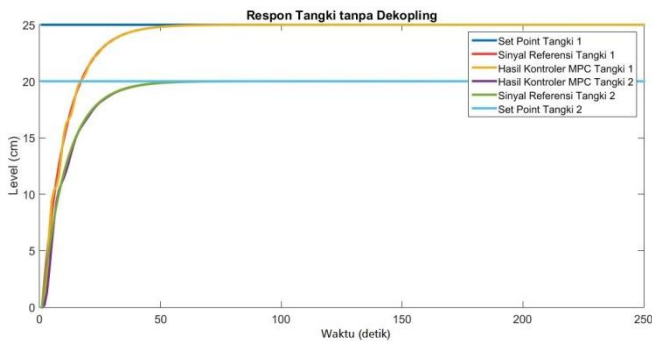
4.4.1 Blok Diagram Simulink



Gambar 4. 12 Diagram Blok *Plant* tanpa Dekopling

4.4.2 Hasil Simulasi

Pada respon *closed loop* pengaturan *level* tanpa dekopling, didapat masih terdapat kesalahan keadaan tunak pada respon sistem, sehingga dirancang kontroler MPC untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak tersebut. Kontroler MPC dirancang dengan metode penghitungan *gain*. Dengan menggunakan kontroler MPC ini didapat respon dari sistem pengaturan *level* Kesalahan keadaan tunak pada *plant* pengaturan *flow* ini dapat dihilangkan dan tidak ada *overshoot* pada respon sistem.



Gambar 4. 13 Hasil Respon Sistem tanpa Dekopling

Terlihat pada tangki 1 dan 2 sudah dapat mengikuti sinyal referensi yang diberikan. Analisa respon dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 13 Analisa Respon Tangki 1

Tangki 1	
<i>Peak Time</i> (s)	52,450
<i>Rise Time</i> (s)	38,480
<i>Settling Time</i> (s)	48,260
<i>Overshoot</i>	0,5890
<i>Ess</i>	5,8612e-5
<i>RMSE</i>	0,7396

Tabel 4. 14 Analisa Respon Tangki 2

Tangki 2	
<i>Peak Time</i> (s)	55,240
<i>Rise Time</i> (s)	37,280
<i>Settling Time</i> (s)	48,700
<i>Overshoot</i>	0,4770
<i>Ess</i>	4,7625e-5
<i>RMSE</i>	0,5010

4.5 Simulasi Pengujian Kontroler MPC pada sistem dengan Dekopling

Setelah memasangkannya pada sistem, kontroler MPC dipasang pada sistem yang telah didekopling untuk melihat perbedaan pada kontroler MPC yang dipasang pada sistem yang belum didekopling.

Tabel 4. 15 Analisis Respon Tangki 1

Tangki 1	
<i>Peak Time</i> (s)	54,720
<i>Rise Time</i> (s)	37,420
<i>Settling Time</i> (s)	47,260
<i>Overshoot</i>	0,4625
<i>Ess</i>	5,2612e-5
<i>RMSE</i>	0,4810

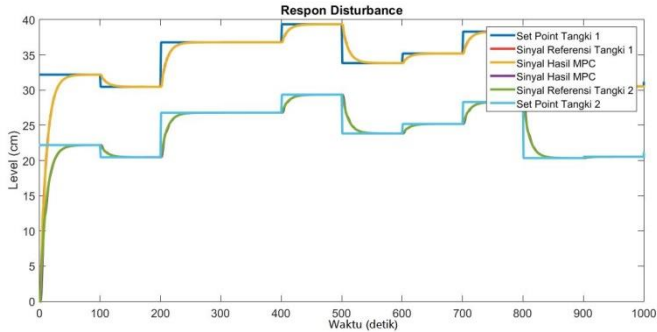
Tabel 4. 16 Analisis Respon Tangki 2

Tangki 2	
<i>Peak Time</i> (s)	57,350
<i>Rise Time</i> (s)	36,980
<i>Settling Time</i> (s)	48,660
<i>Overshoot</i>	0,4190
<i>Ess</i>	4,4625e-5
<i>RMSE</i>	0,4350

Kesimpulannya, sistem dengan dekopling memiliki *error* yang lebih kecil dibandingkan sistem tanpa dekopling.

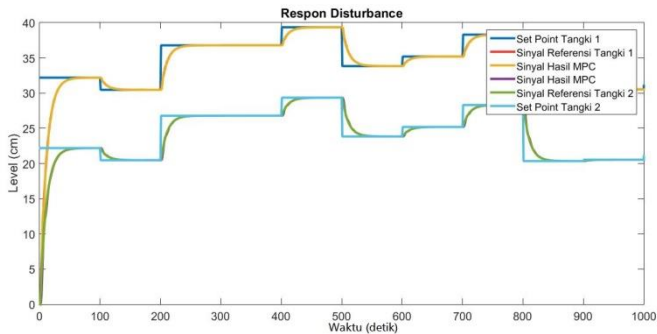
4.6 Simulasi Uji *SetPoint*

Pada sistem ini dilakukan pengujian dengan menambah beban. Setelah melakukan pengujian untuk kontroler MPC. Lalu, pada tahap ini sistem ditambah beban dengan menambah nilai *steam*. Pada Gambar 4.9 dibawah adalah dimana respon *input* berubah untuk membuktikan bahwa kontroler MPC dapat bertahan pada nilai *setpoint* ketika diberi *disturbance random* dengan *input* yang menunjukkan *real system* bahwa beban tidak dapat terprediksi. *Input disturbance random* berubah setiap 70 detik, ketika respon kontroler sudah mencapai *steady state* sesuai pada model yang diinginkan.



Gambar 4. 16 Respon *Disturbance* Sistem tanpa Dekoupling

Respon *Disturbance* tanpa Dekoupling memiliki nilai RMSE sebesar 0,4680

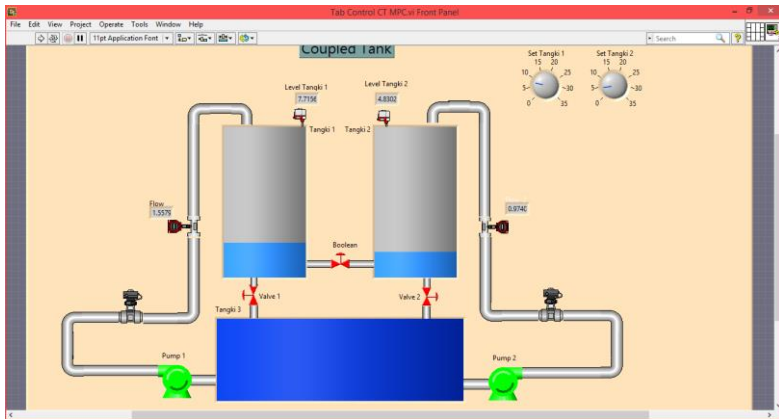


Gambar 4. 17 Respon *Disturbance* Sistem dengan Dekoupling

Respon *Disturbance* tanpa Dekoupling memiliki nilai RMSE sebesar 0,1767

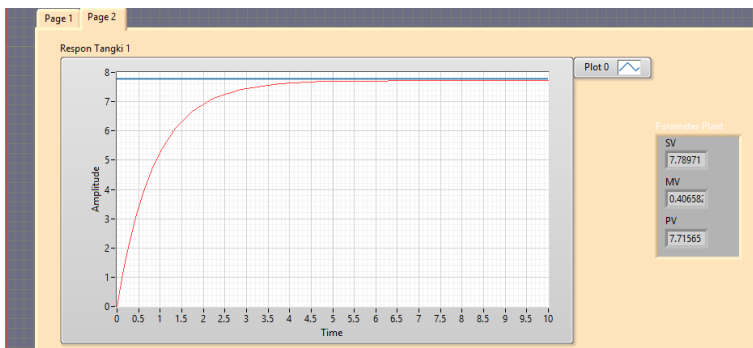
4.7 Simulasi HMI Labview

Setelah membuat diagram blok pada jendela *Simulink*, akan dilihat respon pada HMI. Rancangan yang dibuat adalah tangki 1 dengan tinggi tangki 35 cm dan tangki 2 dengan tinggi tangki 30 cm. Sistem akan mati secara otomatis jika *flow* yang masuk pada tangki melebihi ketinggian 30 cm pada tangki 1 dan 25 cm pada tangki 2.



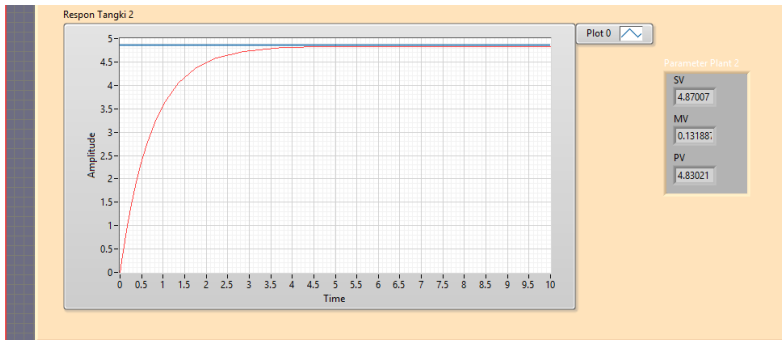
Gambar 4. 18 Tampilan HMI *Coupled Tank*

Untuk melihat *error* respon, pada HMI akan dicantumkan nilai *set point* dan nilai yang terukur.



Gambar 4. 19 Respon Tangki 1

Pada respon tangki 1, terlihat pada pengukuran nilai *set point* yang diberikan sebesar 7,78971 cm dan ketika diukur ketinggian tangki sebesar 7,71565 cm, *Error steady state* yang dihasilkan sebesar 7,406 %



Gambar 4. 20 Respon Tangki 2

Pada respon tangki 1, terlihat pada pengukuran nilai *setpoint* yang diberikan sebesar 4,87007 cm dan ketika diukur ketinggian tangki sebesar 4,83021 cm, *Error steady state* yang dihasilkan sebesar 3,986 %

BAB 5

PENUTUP

Pada Bab ini akan dibahas mengenai hasil akhir dari pengerjaan Tugas Akhir meliputi kesimpulan dan saran sebagai referensi tambahan agar penelitian yang akan dilakukan setelahnya dapat lebih baik lagi.

5.1. Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan terhadap hasil simulasi maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Pengaturan *level* pada *Coupled Tank Plant* menggunakan Kontroler MPC menghasilkan respon sistem yang dapat mengikuti respon model referensi yang diharapkan dengan *time constant* sebesar 25 detik
- b. Pengaruh dekopling pada sistem mempunyai nilai *error* yang kecil dibandingkan dengan sistem tanpa dekopling yaitu sebesar 0,4810 pada tangki 1 dan 0,4350 pada tangki 2
- c. Besar nilai N_p akan mempengaruhi nilai prediksi yang akan mempengaruhi besar respon *plant* ketika diberi *disturbance*. Semakin besar nilai *prediction horizon* menghasilkan nilai *error* lebih kecil yaitu sebesar $2,0612e-9$ pada tangki 1 dan $3,8518e-5$ pada tangki 2.
- d. Parameter control horizon pada kontroler MPC memiliki pengaruh pada sistem. Jika nilai *control horizon* semakin kecil, maka sistem akan memiliki waktu respon yang lebih lambat namun *error*-nya semakin kecil yaitu $7,0973e-5$ pada tangki 1 dan $3,6503e-5$ pada tangki 2.
- e. Parameter *tuning parameter* pada indeks perfromansi, mempunyai pengaruh pada sistem. Jika nilai *tuning parameter* semakin kecil, maka sistem akan memiliki waktu respon yang lebih lambat namun *error*-nya semakin kecil yaitu sebesar $3,9443e-5$ pada tangki 1 dan $3,0861e-5$ pada tangki 2.

5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya karena Kontroler MPC berbasis model, disarankan agar membuat parameter sesuai dengan implementasi *Plant* sehingga mendapatkan *transfer function*nya lebih stabil dalam responnya. Untuk tuning disarankan menambah kontroler PID agar responnya lebih cepat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad Faizal, “Pengendalian Level Coupled Tank Menggunakan Metode Sliding Mode Control (SMC) Hybrid Proportional Integral Derivative (PID) di Simulink Matlab”, **Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro**, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim, 2016.
- [2] Rheza Qashmal Darmawan, “Desain Autotuning Kontroler PID Berbasis Algoritma Neural Network untuk Sistem Pengaturan Cascade level dan Flow Liquid pada Plant Coupled tanks”, **Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2016.
- [3] Muhammad Sadli, “Disain Kontroler PI dengan Decoupling pada Sistem Kendali Level Coupled Tank”, **Jurnal ECOTIPE**, ISSN 2355-5068, Volume 1, No. 2, Oktober 2014.
- [4] Elke Laubwald, “**Coupled Tank System 1**”, <URL: <http://control-system-principles.co.uk>> November 2016
- [5] Muhammad Sadli, “Disain Kontroler PI dengan Decoupling pada Sistem Kendali Level Coupled Tank”, **Jurnal ECOTIPE**, ISSN 2355-5068, Volume 1, No. 2, Oktober 2014.
- [6] Arjin Numsomran, “Design of-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process,” **International Conference on Control**, Pathumwan Institute of Technology, 2007.
- [7] M.S. Ramli, M.A. Ahmad, R.M.T. Raja Ismail, “Comparison of Swarm Adaptive *Neural Network* Control of a *Coupled Tank Liquid Level* System,” **International Conference on Computer Technology and Development**, Kinabalu, 13-15 November 2009.
- [8] Arjin Numsomran, “Design of-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process,” **International Conference on Control**, Pathumwan Institute of Technology, 2007

- [9] Aryani Fabiany, "Perancangan Kontroler PID-GA untuk Sistem Pengaturan *Level* dan *Pressure* pada Simulator *Plant Boiler-Turbine* dengan Metode Dekopling Sistem MIMO," **Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [10] E. F. Camacho, "Model Predictive Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing)", Springer, Inggris, 2000.
- [11] Ilmiyah Elrosa, "*Traction Control* pada *Parallel Hybrid Electric Vehicle* dengan Metode *Generalized Predictive Control*", **Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [12] Seborg, D.E., Mellichamp, D.A., Edgar, T.F., dan Doyle, F.J., "**Process Dynamic and Control**", Wiley, London, 2011
- [13] Jesse Melvin, "Perancangan dan Implementasi Pengendali Model Predictive Control dengan *Constraint* untuk Pengaturan *Level* pada *Coupled-Tank Basic Process Rig 30-100*", **Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro**, Universitas Indonesia, 2008.
- [14] Dian Artanto, "**Interaksi Arduino dan LabVIEW**", Elex Media Komputindo, Jakarta, 2012.
- [15] Chatchaval Pornpatkul, (2009)" *Decentralized Fuzzy Logic Controller for TITO Coupled Tanks Process*, **Procedding IEE**, Department of Instrumentation Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand, CROSSICE International Joint Conference.

RIWAYAT HIDUP



Evira Dyah Puspitarini adalah nama lengkap penulis yang dikenal dengan nama panggilan Vira. Penulis lahir di Ibukota Jawa Barat, Bandung pada tanggal 28 Juli 1994 yang merupakan anak terakhir dari dua bersaudara pasangan Hary Wahyudi dan Erni Erdiyanti. Penulis memulai pendidikannya di Bandung. SD YWKA II, SMP Negeri 9 Bandung, dan SMA 5 Bandung. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2012, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur Mandiri pada tahun yang sama. Konsentrasi penulis adalah pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan dan selama kuliah, penulis aktif menjadi di bidang menejerial pada organisasi mahasiswa jurusan

e-mail : evira.puspitarini12@mhs.ee.its.ac.id
evirapuspitarini@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan