



UNIVERSITAS INDONESIA

**DESAIN *LQR* DAN *EXPLICIT-MPC* UNTUK  
PENGENDALIAN PRESSURIZER**

**TESIS**

Nama : Joko Triyanto  
NPM : 1006788795

FAKULTAS TEKNIK, DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

PROGRAM STUDI TEKNIK KONTROL INDUSTRI

Depok, Juni 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**DESAIN *LQR* DAN *EXPLICIT-MPC* UNTUK  
PENGENDALIAN PRESSURIZER**

**TESIS**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Nama : Joko Triyanto  
NPM : 1006788795

FAKULTAS TEKNIK, DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

PROGRAM STUDI TEKNIK KONTROL INDUSTRI

Depok, Juni 2012

## HALAMAN PERNYATAAN ORIGINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Joko Triyanto

NPM : 1006788795

Tanda Tangan :

Tanggal :

  
29 Juni 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Joko Triyanto

NPM : 1006788795

Program Studi : Teknik Kontrol Industri

Judul Tesis : Desain *LQR* dan *Explicit-MPC* untuk Pengendalian Pressurizer

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Kontrol Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim M.Eng

Penguji 1 : Dr. Ir. Ridwan Gunawan M.T

Penguji 2 : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng

Penguji 3 : Dr. Abdul Muhsin ST, M.Eng,

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Swt, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik, Program Studi Teknik Kontrol Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

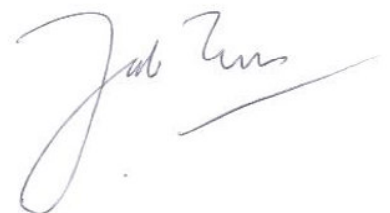
Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. DR. Abdul Halim M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
2. Kementrian Riset dan Teknologi, yang telah memberi beasiswa kepada kami dan mendukung penelitian ini.
3. Isteri dan anak-anak saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
4. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2012

Joko Triyanto



Universitas Indonesia

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama :Joko Triyanto  
NPM :1006788795  
Program Studi : Teknik Kontrol Industri  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif ( *Non-exclusive RoyaltyFree Right* )** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

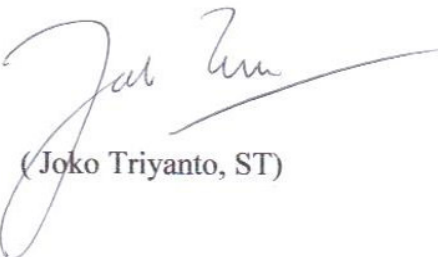
“Desain *LQR* dan *Explicit-MPC* untuk Pengendalian Pressurizer ”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal :29 Juni 2012

Yang Menyatakan

  
(Joko Triyanto, ST)

## ABSTRAK

Nama : Joko Triyanto

Program Studi : Teknik Kontrol Industri

Judul : Desain *LQR* dan *Explicit-MPC* untuk Pengendalian Pressurizer

Sistem kendali pressurizer merupakan hal penting dalam operasional dan keselamatan PLTN type PWR. Pengendalian dilakukan agar tekanan didalam pressurizer tetap konstan dan heater selalu terendam dalam air. Dilakukan desain kendali pressurizer dengan menggunakan *LQR* (*Linear Quadratic Regulator*) dan *Explicit-MPC* (*Model Predictive Control*) sebagai alternative kendali pressurizer, yang selama ini menggunakan *PI* (*Proporsional Integral*). Kendali *Explicit-MPC* berbentuk lookup tabel yang diperoleh menggunakan optimasi multiparametric programming dengan memperhatikan semua batasan input, output dan state. Hasil simulasi kendali *LQR* menunjukkan tekanan pressurizer dapat mengikuti setpoint saat naik dan tidak bisa mengikuti setpoint saat tekanan turun karena adanya batas saturasi dari sinyal kendali spray 0-36 kg/s dan heater 0-1600 kW. Simulasi *Explicit-MPC* menunjukkan kendali ini dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tekanan mengikuti perubahan setpoint walaupun ada batasan saturasi sinyal kendali. Tidak terjadi overshoot saat tekanan naik mengikuti perubahan setpoint 154-156 bar. *Explicit-MPC* juga dapat digunakan untuk menjaga tekanan tetap konstan dari gangguan surge dengan error steady state sebesar 0.021%.

Kata kunci:

*Explicit-MPC*, multiparametric programming, pressurizer, *LQR*, signal constraint

## ABSTRACT

Name : Joko Triyanto

Study Program : Industrial Control Engineering

Title : Design of *LQR* and *Explicit-MPC* for Pressurizer Control

The pressurizer control system is an important thing in operation and safety of PWR nuclear power plants. It is designed in order to keep pressure of pressurizer constant and heater always submerged in water. *LQR* (*Linear Quadratic Regulator*) and *Explicit-MPC* (*Model Predictive Control*) have been used as control methods instead of *PI* (*Proportional Integral*) control. *Explicit-MPC* is realized using lookup table that is obtained from multiparametric programming by taking into account all constraints of input, output and state. Simulation results show that *LQR* control of pressurizer can follow setpoint while ascending and can't follow while setpoint pressure down because of the saturation of control signals spray 0-36 kg/s and heater 0-1600 kW. *Explicit-MPC* has resulted no overshoot response and followed setpoint change setpoint 154-156 bar. *Explicit-MPC* could be used to maintain pressure during surge disturbance with steady state error 0.021 %.

Kata kunci:

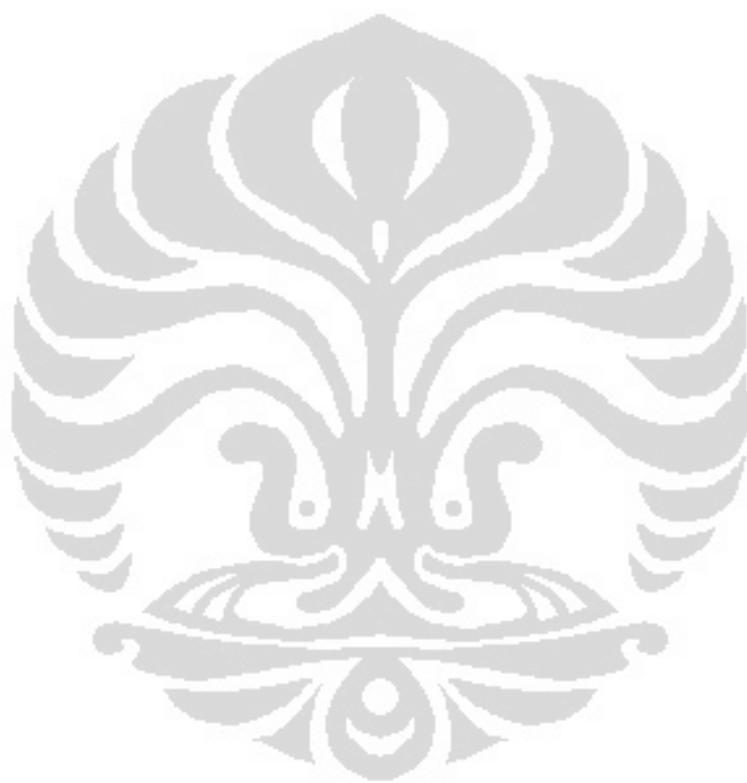
*Explicit-MPC*, multiparametric programming, pressurizer, *LQR*, signal constraint



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN ORIGINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGATAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I: PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang . .....	1
1.2 Batasan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian . .....	3
1.4 Manfaat Penelitian . .....	3
1.5 Methodologi Penelitian. ....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II: LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Pressurizer.....	5
2.2 Model nonlinear Pressurizer.....	7
2.3 Explicit-MPC.....	15
2.4 Multiparametric programming . .....	19
2.5 Reference Tracking.....	26
2.6 Flowchart.....	27
BAB III:DESAIN KENDALI PRESSURIZER.....	31
3.1 Parameter ressurizer.....	31
3.2 Model.....	32
3.3 Desain kendali.....	35
3.3.1 Syarat-syarat desain kendali . .....	36
3.3.2 Kendali LQR.....	36
3.3.3 Explicit-MPC.....	38
BAB IV:SIMULASI DAN PENGUJIAN . .....	41

4.1 Simulasi Tanpa Gangguan .....	41
4.2 Simulasi Gangguan Surge.....	45
BAB V: PENUTUP.....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran .....	55
DAFTAR REFERENSI.....	52



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	System aliaran pendingn PWR .....	5
Gambar 2.2	Pressurizer PLTN dari Westhinghouse .....	6
Gambar 2.3	Model pressurizer.....	8
Gambar 2.4	Model Predictive Control Implementation.....	15
Gambar 2.5	Mapping kendali solusi optimal dengan multiparametric programming.....	16
Gambar 2.6	Daerah kritis, X dan CR.....	24
Gambar 2.7	Reversing tanda ketidaksamaan C1 untuk memperoleh CR	25
Gambar 2.8	Framework multiparametrik programming.....	27
Gambar 2.9	Flowchart mapping control .....	28
Gambar 2.10	Hubungan antara state, banyaknya input dan prediksi horizon terhadap kompleksitas komputasi.....	29
Gambar 3.1	Blok diagram struktur kendali untuk tracking reference	35
Gambar 3.2	Blok diagram struktur kendali terhadap gangguan.....	35
Gambar 3.3	Blok diagram struktur kendali LQR untuk tracking reference.....	37
Gambar 3.4	Pembagian peta kendali daerah sebagai fungsi state $x_1$ (pressure) dan $x_2$ (volume).....	39
Gambar 3.5	Sinyal kendali $u_1$ (heater) dan $u_2$ (spray) sebagai fungsi dari state.....	39
Gambar 3.6	Explicit MPC dengan Saturated heater dan Spray pada Model Nonlinear.....	40
Gambar 4.1	Perbandingan Explicit MPC dan LQR untuk tracking.....	42
Gambar 4.2	Sinyal reference pressure dan volume air.....	42
Gambar 4.3	Keluaran Pressure antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking.....	43

Gambar 4.4	Keluaran volume antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking.....	43
Gambar 4.5	Sinyal kendali spray antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking.....	44
Gambar 4.6	Sinyal kendali heater antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking.....	44
Gambar 4.7	Kendali LQR dan Explicit-MPC pada model non linear tanpa saturasi input.....	45
Gambar 4.8	Keluaran tekanan kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan insurge sebesar 4 kg/s.....	46
Gambar 4.9	Keluaran level air kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan insurge sebesar 4 kg/s	46
Gambar 4.10	Sinyal kendali Spray dengan gangguan insurge sebesar 4 kg/s.....	47
Gambar 4.11	Keluaran tekanan kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar -4 kg/s	47
Gambar 4.12	Keluaran volume air kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar -4 kg/s.....	48
Gambar 4.13	Sinyal kendali heater dan spray untuk Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar -4 kg/s.....	48
Gambar 4.14	Gambar 4.14 Sinyal gangguan surge uniform -4s/d 4 kg/s	49
Gambar 4.15	Keluaran tekana kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan surge random uniform -4 s/d 4 kg/s .....	49
Gambar 4.16	Keluaran level air kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan surge random uniform -4 s/d 4 kg/s.....	50
Gambar 4.17	Sinyal Gangguan surge outsurge dan insurge .....	50
Gambar 4.18	Keluaran tekanan kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input .....	51
Gambar 4.19	Keluaran volume kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input.....	51

Gambar 4.20 Keluaran heater kendali Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input..... 52



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data parameter Pressurizer AP1000 Whesthinghouse .....	31
Tabel 4.1	Besar error hasil simulasi dengan explicit-MPC dengan adanya gangguan surge.....	53



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Pada Sistem Pembangkit Uap Nuklir jenis Pressure Water Reactor, reactor didinginkan oleh air bertekanan tinggi yang disirkulasikan membentuk sistem tertutup disebut sistem primer. Tekanan tinggi ini diperlukan agar dalam pemindahan panas dari reactor air tersebut tidak mendidih. Alat pembuat tekanan dan menjaga agar tetap tinggi disebut pressurizer. Jumlah pressurizer hanya satu pada tiap unit PLTN, berbeda dengan pompa primer atau pembangkit uap yang jumlahnya sebanyak loop yang ada 2, 3 atau 4 buah.

Pressurizer mempunyai daerah uap pada bagian atas dan air pada bagian bawah. Air yang masuk dan keluar dibagian bawah pressurizer melalui surge (*insurge* dan *outsurge*) adalah akibat dari perubahan-perubahan temperatur dan tekanan dari sistem yang terhubung dengan pressurizer. Pressurizer ini bekerja berdasarkan sifat-sifat air yang dijaga dalam keseimbangan dengan uap air pada temperatur dan bertekanan tertentu yaitu tekanan uap jenuh pada temperatur tersebut. Jadi didalam pressurizer terdapat air dan uap yang diusahakan dalam keseimbangan. Pada waktu operasi volume pressurizer di isi air sebanyak 60% dan uap sebanyak 40%. Pemanasan dilakukan dengan pemanas listrik (*heater*), penurunan temperatur dilakukan dengan penyemprotan air dingin (diambil dari system primer sesudah pembangkit uap) lewat *spray nozzle* yang berada diujung atas pressurizer. Apabila kenaikan tekanan/temperatur akan diluar kemampuan spray, maka terbukalah katub pembatas (*relief valve*) atau bila lebih jauh lagi maka terbukalah katub pengaman (*safety valve*). Untuk menghindari kerugian kalor ke lingkungan pipa-pipa pada siklus primer, permukaan pressurizer dilapisi dengan isolator sehingga temperature permukaan luar tidak lebih dari 50°C.

Sistem kendali pressurizer merupakan hal yang sangat penting dalam operasional dan keselamatan pembangkit. Untuk itu perlu dilakukan simulasi pengendalian pressurizer dengan menggunakan model sehingga didapat pengendali (*controller*) yang optimal dan handal.

Terdapat beberapa model pressurizer yang sudah dikembangkan dari tahun 1971 sampai sekarang, yang sesuai dengan keadaan operasional PLTN misalnya model dua dan tiga fase dalam keadaan tidak setimbang dan transien [1]. Untuk penelitian ini dipilih model satu fase dalam keadaan setimbang, model ini dipilih karena sederhana dan cukup jelas menjelaskan perilaku pressurizer pada keadaan mantap dan transien. Model satu fase ini belum bisa menggambarkan proses kondensasi dan laju penguapan yang di dalam pressurizer yang terdiri dari dua fase uap dan air.

Sistem kendali Pressurizer ini penting dalam operasional dan keselamatan pembangkit. Prosedur ini dilakukan dengan mengatur agar tekanan dalam pressurizer konstan dan level air dijaga agar pemanas (*heater*) selalu berada didalam air. Proses termohidrolik dan pengendalian yang berlangsung dalam pressurizer sangat penting dipelajari karena akan menentukan keselamatan operasi sistem secara keseluruhan. Untuk itu perlu dilakukan simulasi pengendalian pressurizer dengan menggunakan model sehingga didapat pengendali (*controller*) yang optimal dan handal

Untuk itu perlu dicari metode pengendalian tekanan dan level air yang aman, optimal dan robust. Sistem kendali yang diinginkan adalah sistem kendali yang dapat mengikuti perubahan setpoint dan mempertahankan tekanan terhadap gangguan surge. Pressurizer mempunyai dua masukan (*heater* dan *spray*), dua keluaran (tekanan dan level air) serta masukan surge berupa gangguan perubahan laju aliran pendingin. Ada batasan (*constraint*) nilai masukan untuk heater dari 0 sampai 1600 kW dan spray dari 0 sampai 36 kg/s.

Metode kendali tekanan dan level air pressurizer yang dipakai pada saat ini adalah kendali PI (*Propositional Integral*) dan kendali on/off, metode ini dipilih karena murah dan mudah aplikasinya [2]. Selain itu juga telah dilakukan studi pengendalian level prssurizer dengan menggunakan CMAC dan PID [3]. Penelitian aplikasi fuzzy logic untuk kendali juga digunakan dalam pengendalian pressurizer [4]. Simulasi kendali prediksi dengan DMC juga pernah dilakukan[5]. Sistem kendali yang ditawarkan dalam penelitian ini kendali optimal dengan



*Explicit-MPC* yang mempertimbangkan batasan, dapat bekerja dengan singkat dan hemat energi

## 1.2 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini model pressurizer dibatasi dalam operasi dalam kondisi operasi normal yang kemudian terjadi gangguan *insurge /outsurge* karena perubahan laju aliran pendingin primer. Pressurizer diasumsikan terisolasi sempurna sehingga transfer panas ke dinding pressurizer diabaikan. Pressurizer diasumsikan dalam keadaan saturasi serba sama dan tekanan uap diasumsikan sama dengan tekanan cairan.

Melakukan desain kendali baru sebagai alternatif dari kendali PI yang sudah dipakai dalam Pressurizer. Sistem kendali yang dipilih adalah kendali *Explicit-MPC* dengan mempertimbangkan batasan input yaitu heater yang mempunyai batasan nilai 0 sampai 1600 kW dan spray mempunyai batasan dari 0 sampai 36 kg/s. *Heater* dan *spray* ini merupakan sinyal kendali untuk mengendalikan tekanan dan volume pressurizer. Tekanan pressurizer dibatasi dari 149 bar sampai 159 bar. Selama simulasi heater selalu terendam dalam air sehingga volume air didalam pressurizer dibatasi minimal  $17.5\text{m}^3$  dan maksimal  $37.5\text{m}^3$ .

Untuk melihat kinerja dari *Explicit-MPC* ini maka hasil dibandingkan dengan LQR (*linear Quadratic Regulator*) konvensional.

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang sistem kendali optimal untuk mengendalikan tekanan dan level air pressurizer untuk reaktor tipe PWR dengan menggunakan model pressurizer satu fase dalam kesetimbangan.
2. Mempelajari *Explicit-MPC* untuk pengendalian sistem dan aplikasinya.
3. Melihat kinerja kendali *Explicit-MPC* dalam pengendalian tekanan dan level pressurier.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian akan menambah sistem kendali pressurizer, sebagai alternative sistem kendali untuk “*Nuclear Power Plant Training Simulator*”. Simulator ini sebagai sarana pelatihan sistem kendali PLTN tipe PWR.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini

1. Studi pustaka  
Pengumpulan data pressurizer yang meliputi perilaku persurizer pada keadaan mantap dan transien dan model dinamik pressurizer.
2. Pembuatan model pressurizer dengan menggunakan Simulink-Matlab™.
3. Validasi model dengan menggunakan data percobaan pressurizer.
4. Merancang kendali pressurizer dengan *LQR* dan *Explicit-MPC*.
5. Membandingkan efektivitas kinerja *Explicit-MPC* dan *LQR* konvensional.

## 1.6 . Sistematika Penulisan

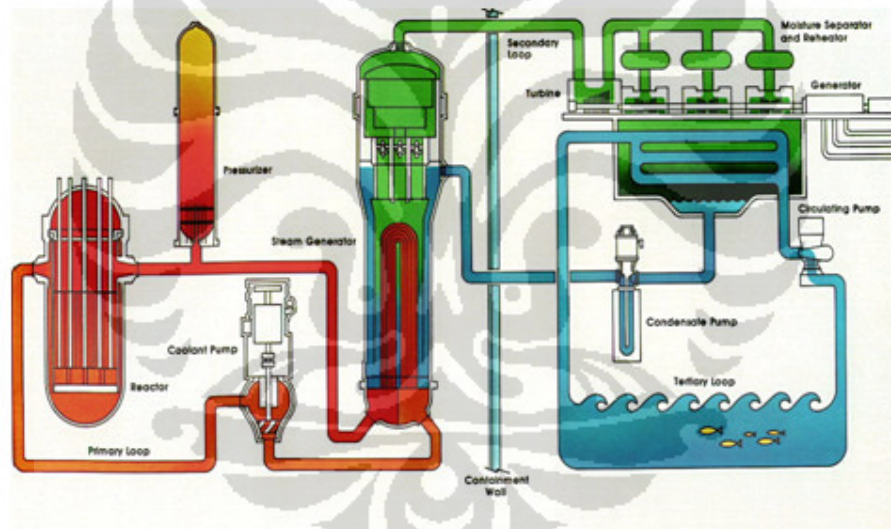
Bab satu merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan metodologi. Pada bab dua membahas landasan teori tentang pressurizer yang berisi tentang prinsip kerja, model matematik nonlinear satu fase, teori tentang *LQR* dan *Explicit-MPC* dengan multiparametric toolbox. Bab tiga membahas tentang desain kendali pressurizer yang berisi model pressurizer, desain kendali *LQR* dan *Explicit-MPC*. Bab empat tentang simulasi dan pengujian membahas hasil simulasi pengendalian *LQR* dan *Explicit-MPC*. Pada bab lima berupa penutup yang berisi kesimpulan dan saran.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Pressurizer

Pada sistem pembangkit uap nuklir jenis Pressure Water Reactor (PWR), reactor didinginkan oleh air bertekanan tinggi yang disirkulasikan membentuk sistem tertutup yang disebut sistem primer. Tekanan tinggi ini diperlukan agar dalam pemindahan panas dari reactor air tersebut tidak mendidih. Alat pembuat tekanan dan menjaga agar tetap tinggi disebut pressurizer. Jumlahnya hanya satu pada tiap unit PLTN. Gambar 2.1 menunjukkan sistem aliran pendingin pada reaktor PWR.



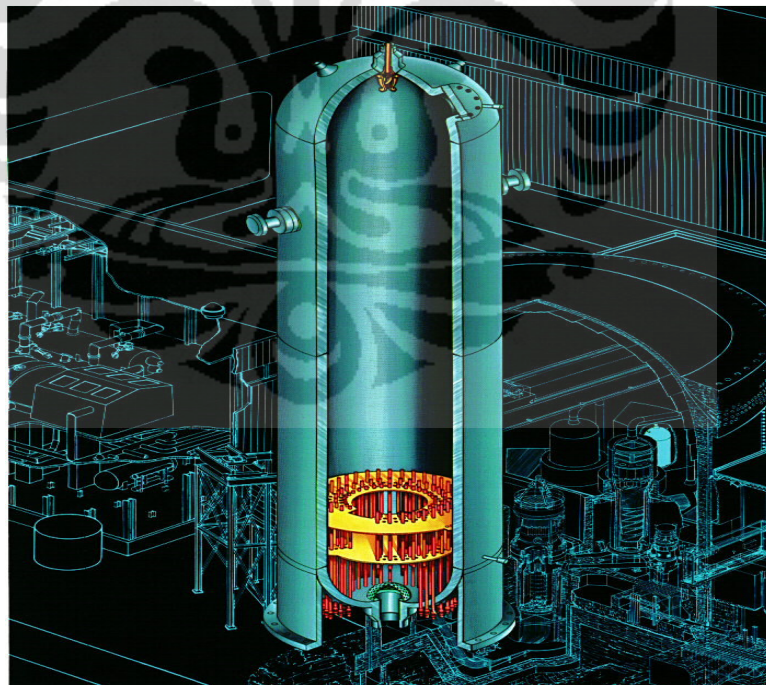
Gambar 2.1 System aliran pendingin PWR dari Westinghouse™ [6]

Pressurizer berfungsi untuk: menjaga tekanan sistem suatu harga tertentu diatas titik jenuh, tempat ekspansi cairan dan kontraksi, tempat pengendalian tekanan dan tempat untuk menghilangkan gas yang terlarut dari sistem lewat ventilasi ruang uap pressurizer. Gambar 2.2 menunjukkan jenis pressurizer dari Westinghouse™. Selain itu *pressurizer* juga berfungsi sebagai tangki kompensasi volume (*surge tank*).

Alat ini bekerja berdasarkan sifat-sifat bahwa air dijaga dalam keseimbangan antara uap dan air pada temperatur dan tekanan tertentu, yaitu

tekanan uap jenuh dan temperatur jenuh. Misalnya pada temperatur jenuh air 240C dan bertekanan 150 bar. Di dalam pressurizer terdapat air dan uap yang diusahakan dalam keseimbangan pada tinggi muka air tertentu, dalam kondisi operasi 60% volume berisi air dan 40% uap. Selanjutnya temperatur dan pressure dijaga tetap konstan dengan pemanasan air bila temperatur kurang panas, serta dengan semprotan air dingin pada uapnya bila terlalu panas. Pemanasan dilakukan dengan pemanas listrik, penurunan temperatur dilakukan dengan penyemprotan air dingin yang diambil dari sistem primer sesudah pembangkit uap lewat spray nozzle diujung atas.

Bila beban listrik PLTN bertambah maka temperatur system primer akan sedikit menurun, sehingga tinggi permukaan air akan menurun dan pemanas (*heater*) akan bekerja. Sebaliknya jika beban listrik PLTN menurun maka temperatur system primer akan menaik sehingga tinggi permukaan akan naik maka semprotan air dingin dari sprayer.



Westinghouse PRESSURIZER

Gambar 2.2. Pressurizer PLTN dari Westinghouse™[6]

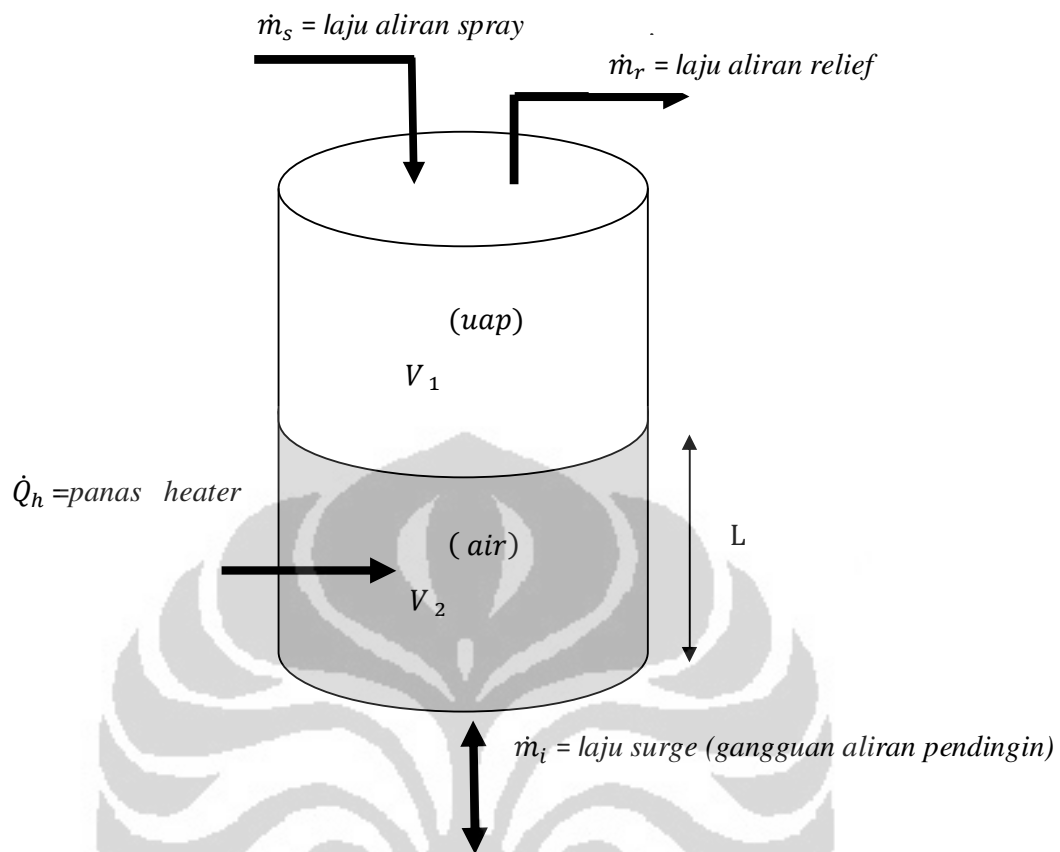
Jadi pressurizer disini akan berfungsi sebagai sistem control surge tank, ada dua jenis surge yaitu *insurge* dan *outsurge*. *Insurge* masuknya air pendingin sistem primer kedalam presurizer sehingga meningkatnya volume presurizer. *Insurge* terjadi karena volume diserap dalam pressurizer selama kenaikan muka air (*level*) untuk mengkompensasi kenaikan temperatur sistem. *Outsurge* volume dilepaskan dari pressurizer selama penurunan level air untuk mengkompensasi penurunan temperatur sistem. Bila spray tidak mampu menurunkan kenaikan tekanan maka katub pembatas (*relief valve*) terbuka atau bila tekanan sangat besar maka katub pengaman (*safety valve*) terbuka

Pressurizer mempunyai daerah uap pada bagian atas dan air pada bagian bawah. Air yang masuk dan keluar dibagian bawah pressurizer melalui surge (*insurge* dan *outsurge*) adalah akibat dari perubahan-perubahan temperatur dan tekanan dari system yang terhubung dengan pressurizer (*hotleg*). Untuk menjalankan fungsinya pressurizer dilengkapi dengan alat pemanas (*heater*) untuk menaikkan tekanaan melalui penguapan air dan spray untuk menurunkan tekanan melalui kondensasi

## 2.1 Model Nonlinear Pressurizer

Untuk mendesain sistem kendali diperlukan model sehingga dapat pengendali (*controler*) yang optimal dan handal. Terdapat beberapa model pressurizer yang sudah dikembangkan dari tahun 1971 sampai sekarang, yang sesuai dengan keadaan operasional PLTN. Dalam penelitian ini dipilih model model satu fase setimbang dan dalam keadaan saturasi, model ini dipilih kdaerahnnya cukup jelas menjelaskan perilaku pressurizer pada keadaan transien dan sederhana. keuntungan dari model ini sederhana dan mampu menggambarkan perilaku pressurizer pada saat keadaan mantap dan transien.

Model satu fase dalam dalam kesetimbangan menganggap *pressurizer* dalam kondisi operasi normal, uap dan air yang didalam pressurizer berada dalam kesetimbangan jenuh. Pada keadaan setimbang, uap ada diatas dan air ada di bagian bawah yang dibatasi oleh *liquid-vapor boundary* kondisi jenuh [7].



Gambar 2.3. Model Pressurizer

Asumsi-aumsi yang dipakai dalam pengembangan pressurizer seperti pada Gambar 2.3 sebagai berikut:

- Model pressurizer digunakan satu daerah dalam keseimbangan yang berarti air dan uap dalam pressurizer selalu dalam keadaan jenuh.
- Katub *relief* dan *safety* pada pressurizer diasumsikan selalu ditutup dalam iterasi program
- Spray tidak dimodelkan pada sistem pressurizer
- Simulasi dilakukan pada titik operasi pressurizer yang mana pada titik tersebut fasa air bersifat incompressible dan fasa uap bersifat dapat dimampatkan
- Besaran fisis diambil unit besaran fisik yang digunakan dalam pressurizer diambil dari tabel file Matlab XSteam® [8].

- f) Model matematik presurizer dikembangkan dari persamaan kekekalan massa, konservasi energi dan konservasi volume total

Persamaan dinamik pressurizer ada 3 persamaan yang mengatur untuk model simulasi pressurizer meliputi

- a) kekekalan massa
- b) konservasi energi
- c) konservasi dari total volume

Model ini mempunyai lima variabel input yang diperlukan untuk simulasi dinamik pressurizer yang terdiri dari:

- a)  $\dot{m}_i$  = laju aliran air massa surge (kg/s) yang merupakan gangguan yaitu perubahan laju aliran pendingin
- b)  $h_i$  = entalphi surge (kJ/kg)
- c)  $\dot{m}_s$  = laju aliran spray (kg/s)
- d)  $h_{spray}$  = entalphi spray (kJ/kg)
- e)  $\dot{Q}_h$  = laju kalor pemanas (*heater*)

Sedangkan ouputnya ada dua buah yaaitu

- a)  $p$  = tekanan (bar/s)
- b)  $V_2$  = perubahan volume cairan (m)

Persamaan-persamaan yang menggambarkan perilaku *pressurizer* adalah sebagai berikut [9] :

1. kekekalan massa

$$\frac{d}{dt}(m_{total}) = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \quad (2.1)$$

2. konservasi energi

$$\frac{d}{dt}(Q_{total}) = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h + p \frac{d}{dt}(V_{total}) \quad (2.2)$$

3. konservasi dari total volume

$$\frac{d}{dt}(V_{total}) = \frac{d}{dt}(V_1 + V_2) = 0 \quad (2.3)$$

dengan

$m_{total}$  = massa total pressurizer (kg)

$\dot{m}_i$  = laju aliran massa air pendingin pada surge line (kg/s)

$\dot{m}_s$  = laju aliran massa pada spray line (kg/s)

$\dot{m}_r$  = laju aliran massa pada katup relief (kg/s)

$Q_{total}$  = total energy pressurizer

$h_i$  = enthalpi air pada surge (kJ/kg)

$h_s$  = enthalpi air pada spray (kJ/kg)

$h_1$  = enthalpi uap (kJ/kg)

$\dot{Q}_h$  = laju kalor penguapan pada heater (Watt)

$p$  = Tekanan Pressurizer (bar)

$V_{total}$  = Volume total Pressurizer(m<sup>3</sup>)

$V_2$  = Volume air Pressurizer

$V_1$  = volume uap Pressurizer

Dari persamaan konservasi volume (2.3), karena volume pressurizer tetap maka perubahan volume cairan sama dengan perubahan volume uap dengan berlawanan tanda

$$\frac{d}{dt}(V_{total}) = \frac{d}{dt}(V_1 + V_2) = 0$$

sehingga

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{dV_2}{dt}$$

$$\dot{V}_1 = -\dot{V}_2 \quad (2.4)$$

Dari penurunan persamaan kekekalan massa (2.1) didapat persamaan densitas (rapat jenis), volume air pada fase uap dan cair, diasumsikan bahwa laju aliran massa pada pressurizer nol.



$$\frac{d}{dt}(m_{total}) = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r$$

dengan  $m_{total} = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$

$$\frac{d}{dt}(\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2) = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r$$

$$\left(\frac{d\rho_1}{dt} V_1 + \rho_1 \frac{dV_1}{dt}\right) + \left(\frac{d\rho_2}{dt} V_2 + \rho_2 \frac{dV_2}{dt}\right) = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \quad (2.5)$$

Dengan  $\dot{V}_1 = -\dot{V}_2$  disubsitusikan kedalam persamaan 3.5 didapat persamaan (2.6)

$$\frac{d\rho_1}{dt} V_1 + \frac{d\rho_2}{dt} V_2 + (\rho_2 - \rho_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \quad (2.6)$$

Densitas cairan ( $\rho_2$ ) dan uap ( $\rho_1$ ) merupakan fungsi tekanan

$$\rho_1 = f(p), \quad \rho_2 = f(p)$$

Dari persamaan (2.6) akan diturunkan lebih lanjut sebagai fungsi dari perubahan tekanan dan perubahan volume cairan pressurizer terhadap waktu. Linearisasi laju perubahan densitas uap dan cairan ini dilakukan sebagai berikut:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{d\rho_1}{dp} \frac{dp}{dt}, \quad \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{d\rho_2}{dp} \frac{dp}{dt}$$

jika  $\bar{\rho}_1 = \frac{d\rho_1}{dp}$ ,  $\bar{\rho}_2 = \frac{d\rho_2}{dp}$  dan  $\dot{p} = \frac{dp}{dt}$  maka

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \bar{\rho}_1 \dot{p}, \quad \frac{d\rho_2}{dt} = \bar{\rho}_2 \dot{p}$$

Sehingga persamaan neraca massa (2.6) menjadi.

$$\frac{d\rho_1}{dt} V_1 + \frac{d\rho_2}{dt} V_2 + (\rho_2 - \rho_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r$$

$$(\bar{\rho}_1 V_1 + \bar{\rho}_2 V_2) \dot{p} + (\rho_2 - \rho_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \quad (2.7)$$

Substitusi persamaan  $V_1 = V_{tot} - V_2$  kedalam persamaan (2.7) sehingga didapat persamaan 2.8

$$(\bar{\rho}_1 V_{tot} + (\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1))\dot{p} + (\rho_2 - \rho_1)\dot{V}_2 = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \quad (2.8)$$

Dari persamaan konservasi energi (2.2)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(Q_{total}) &= \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h + p \frac{d}{dt}(V_{total}) \\ Q_{total} &= \rho_1 V_1 h_1 + \rho_2 V_2 h_2, \text{ dan } \frac{d}{dt}(V_{total}) = 0 \\ \frac{d}{dt}(\rho_1 V_1 h_1 + \rho_2 V_2 h_2) &= \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \\ \left( \frac{d\rho_1}{dt} V_1 h_1 + \rho_1 \frac{dV_1}{dt} h_1 + \rho_1 V_1 \frac{dh_1}{dt} + \frac{d\rho_2}{dt} V_2 h_2 + \rho_2 \frac{dV_2}{dt} h_2 + \rho_2 V_2 \frac{dh_2}{dt} \right) &= \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \end{aligned} \quad (2.9)$$

Enthalphy cairan ( $h_2$ ) dan enthalphi uap ( $h_1$ ) sebagai fungsi tekanan

$$h_1 = f(p), \quad h_2 = f(p)$$

Dengan cara yang sama seperti diatas dilakukan linearisasi  $h_1$  dan  $h_2$  maka akan didapat

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{dh_1}{dp} \frac{dp}{dt}, \quad \frac{dh_2}{dt} = \frac{dh_2}{dp} \frac{dp}{dt}$$

Jika  $\bar{h}_1 = \frac{dh_1}{dp}$ ,  $\bar{h}_2 = \frac{dh_2}{dp}$  dan  $\dot{p} = \frac{dp}{dt}$  maka

$$\frac{dh_1}{dt} = \bar{h}_1 \dot{p}, \quad \frac{dh_2}{dt} = \bar{h}_2 \dot{p}$$

Sehingga persamaan (2.9) dapat ditulis

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{d\rho_1}{dp} \frac{dp}{dt} V_1 h_1 + \rho_1 \frac{dV_1}{dt} h_1 + \rho_1 V_1 \frac{dh_1}{dp} \frac{dp}{dt} + \frac{d\rho_2}{dp} \frac{dp}{dt} V_2 h_2 + \rho_2 \frac{dV_2}{dt} h_2 \right. \\
& \quad \left. + \rho_2 V_2 \frac{dh_2}{dp} \frac{dp}{dt} \right) = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \\
& (\bar{\rho}_1 \dot{p} V_1 h_1 + \rho_1 \dot{V}_1 h_1 + \rho_1 V_1 \bar{h}_1 \dot{p} + \bar{\rho}_2 \dot{p} V_2 h_2 + \rho_2 \dot{V}_2 h_2 + \rho_2 V_2 \bar{h}_2 \dot{p}) \\
& = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \tag{2.10}
\end{aligned}$$

Substitusi  $\dot{V}_1 = -\dot{V}_2$  dan  $V_1 = V_{tot} - V_2$  kedalam persamaan (2.10) didapat persamaan (2.11)

$$\begin{aligned}
& (\bar{\rho}_1 \dot{p} (V_{tot} - V_2) h_1 + \rho_1 (-\dot{V}_2) h_1 + \rho_1 (V_{tot} - V_2) \bar{h}_1 \dot{p} + \bar{\rho}_2 \dot{p} V_2 h_2 + \rho_2 \dot{V}_2 h_2 \\
& \quad + \rho_2 V_2 \bar{h}_2 \dot{p}) = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \tag{2.11}
\end{aligned}$$

Persamaan (2.11) diatas dikelompokan terhadap laju pressure dan volume air

$$\begin{aligned}
& \{ (\bar{\rho}_1 h_1 + \rho_1 \bar{h}_1) V_{tot} + (\bar{\rho}_2 h_2 + \rho_2 \bar{h}_2 - \bar{\rho}_1 h_1 - \rho_1 \bar{h}_1) V_2 \} \dot{p} \\
& \quad + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \tag{2.12}
\end{aligned}$$

Dari persamaan (2.8) dan (2.12) merupakan persamaan simultan fungsi dari  $\dot{p}$  dan  $\dot{V}_2$

$$\begin{aligned}
& (\bar{\rho}_1 V_{tot} + (\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1) V_2) \dot{p} + (\rho_2 - \rho_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \\
& \{ (\bar{\rho}_1 h_1 + \rho_1 \bar{h}_1) V_{tot} + (\bar{\rho}_2 h_2 + \rho_2 \bar{h}_2 - \bar{\rho}_1 h_1 - \rho_1 \bar{h}_1) V_2 \} \dot{p} \\
& \quad + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1) \dot{V}_2 = \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h
\end{aligned}$$

misalkan

$$a1 = \bar{\rho}_1 V_{tot}$$

$$a2 = \bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1$$

$$a3 = (\rho_2 - \rho_1)$$

$$b1 = (\bar{\rho}_1 h_1 + \rho_1 \bar{h}_1) V_{tot}$$

$$b2 = (\bar{\rho}_2 h_2 + \rho_2 \bar{h}_2 - \bar{\rho}_1 h_1 - \rho_1 \bar{h}_1)$$

$$b3 = (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

Maka persamaan simultan diatas menjadi

$$\left. \begin{aligned} (a1 + a2V_2) \dot{p} + a3\dot{V}_2 &= \dot{m}_i + \dot{m}_s - \dot{m}_r \\ (b1 + b2V_2) \dot{p} + b3\dot{V}_2 &= \dot{m}_i h_i + \dot{m}_s h_s - \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_h \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) merupakan persamaan non linear merupakan fungsi turunan dari  $p$  dan dapat diselesaikan dengan perkalian matrik

$$\begin{bmatrix} a1 + a2V_2 & a3 \\ b1 + b2V_2 & b3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_i & h_s & -h_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_s \\ \dot{m}_r \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} a1 + a2V_2 & a3 \\ b1 + b2V_2 & b3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ h_i & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_s \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dengan

$$\left. \begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} a1 + a2V_2 & a3 \\ b1 + b2V_2 & b3 \end{bmatrix} \\ N &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_i & h_s & -h_1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Sehingga persamaan (2.16) dapat ditulis menjadi

$$M \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_s \\ \dot{m}_r \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = M^{-1} N \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_s \\ \dot{m}_r \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

### 2.3 Explicit-MPC

Model Predictive Control (MPC) selama 20 tahun terakhir telah diperkenalkan sebagai metode kontrol yang sangat sukses di industri proses. Hal ini terjadi karena kemampuan dalam MPC bekerja dengan batasan (*constrain*) input, output dan state. Di dalam proses industri dengan konstanta waktu besar (lambat) sangat memungkinkan optimasi realtime secara numerik, sedangkan untuk sistem yang sistem kritis yang cepat dan keselamatan maka metode ini tidak dapat diandalkan. Dalam beberapa tahun terakhir dikembangkan sistem kendali *Explicit MPC* dengan menggunakan pemrograman parametrik.

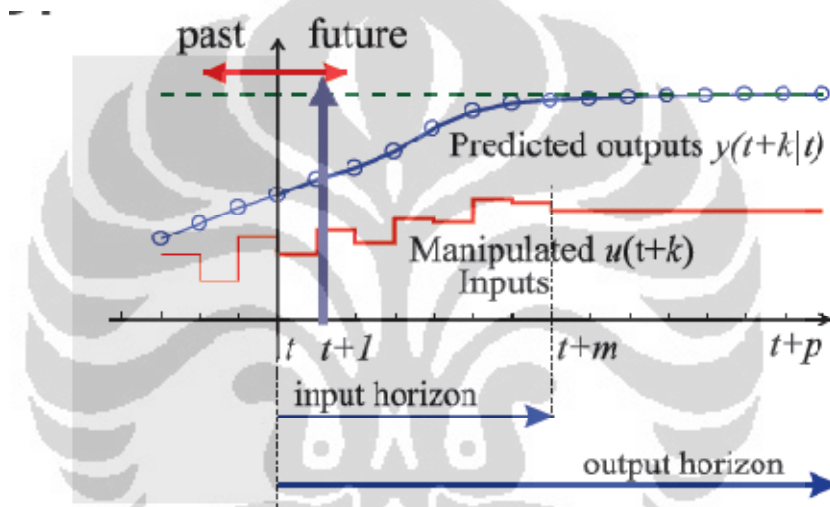
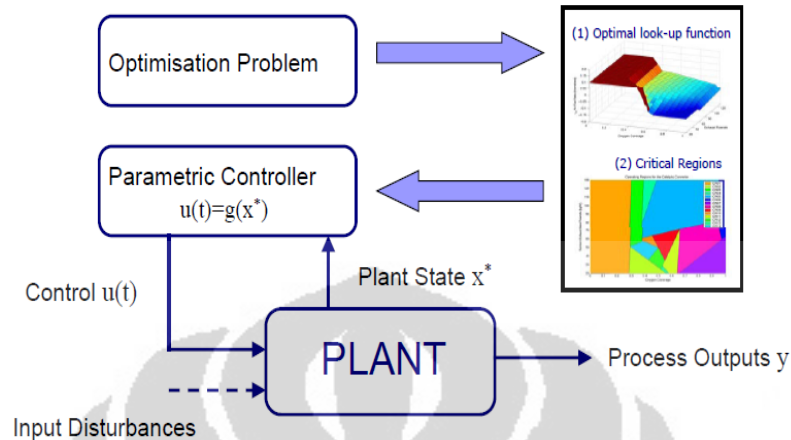


Figure 2.4 . Model Predictive Control implementation[ 10.]

Metode ini melakukan perhitungan seluruh state untuk mendapatkan sinyal kendali, sehingga diperoleh sinyal kendali sebagai fungsi parameter dari state dengan memperhatikan semua batasan dari sistem. Tidak perlukan lagi optimasi ulang karena solusi optimal sudah diperoleh secara lengkap sebagai fungsi kondisi operasi.

Pada MPC standart sinyal kendali diperoleh dari optimasi yang dilakukan sepanjang horizon, dilakukan terus-menerus untuk waktu berikutnya (online optimasi). Pada *Explicit-MPC* sinyal kendali diperoleh dalam bentuk peta kendali untuk seluruh state dengan optimasi sekali, sehingga dapat disebut kontrol lookup table. *Eksplisit-MPC* merupakan kontrol lanjutan dengan menggunakan metode

pemrograman multi-parametrik untuk menyelesaikan masalah optimasi online pada MPC dengan cara mendapatkan mapping kendali optimal sebagai fungsi dari variabel state.



Gambar 2.5 Mapping kendali solusi optimal dengan multi-parametric programming [10.]

Dengan demikian, masalah optimasi online yang ada dalam MPC diganti dengan mapping fungsi kendali yang sederhana sehingga dapat mengurangi komputasi online. Sehingga memungkinkan diimplementasikan dalam perangkat keras komputasi sederhana seperti microchip pada sistem embedded dan membuat *Explicit-MPC* cocok untuk aplikasi kontrol cepat[10]. Konsep mengganti optimasi online melalui pemetaan yang tepat dari solusi optimal, dikenal sebagai "optimasi online melalui optimasi off-line" dengan menggunakan multiparametrik programming[11]

. Suatu model matematis umum diskrit waktu, untuk sistem linier time invariant [12]

$$\left. \begin{aligned} x_{t+1} &= Ax_t + Bu_t \\ x_t &= Cx_t \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

yang mempunyai batasan :

$$\begin{aligned} y_{min} &\leq y_t \leq y_{max} \\ u_{min} &\leq u_t \leq u_{max} \end{aligned} \quad (2.20)$$

dengan  $x_t \in \mathbb{R}^n, u_t \in \mathbb{R}^m$  dan  $y_t \in \mathbb{R}^p$  adalah state, masukan, dan vektor output subskrip min dan max menunjukkan batas bawah dan atas dan pasangan matriks (A, B) mempunyai sifatnya stabil. MPC linier menyelesaikan persamaan ( 2.19) ke dalam fungsi optimasi kwadratik [12].

$$\begin{aligned} \min_U J(U, x_t) &= x'_{t+N_y|t} P x_{t+N_y|t} + \sum_{k=0}^{N_y-1} x'_{t+k|t} Q x_{t+k|t} + u'_{t+k} R u_{t+k} \\ \text{batasan } y_{min} &\leq y_{t+k|t} \leq y_{max}, \quad k = 1, \dots, N_c \\ u_{min} &\leq u_{t+k|t} \leq u_{max}, \quad k = 0, 1, \dots, N_c \\ x_{t|t} &= x_t, \\ x_{t+k+1|t} &= A x_{t+k|t} + B u_{t+k|t}, \quad k \geq 0 \\ y_{t+k|t} &= C x_{t+k|t}, \quad k \geq 0 \\ u_{t+k} &= K x_{t+k|t}, \quad N_c \leq k \leq N_y \end{aligned} \quad (2.21)$$

dengan  $U \triangleq \{u_t, \dots, u_{t+N_u-1}\}$ ,  $Q = Q' \geq 0, R = R' > 0, P \geq 0, (Q^{\frac{1}{2}}, A)$  terdeteksi,  $N_u, N_y, N_c$  adalah input, output, dan batas horizon, sehingga  $N_y \geq N_u$  dan  $N_c \leq N_y - 1$ ,  $K$  adalah state umpan balik untuk menstabilkan sistem. Persamaan (2.21) dapat diselesaikan secara berulang-ulang pada tiap waktu  $t$  dengan mengukur  $x_t$  dan vector prediksi state,  $x_{t+1|t}, \dots, x_{t+k|t}$  pada  $t+1, \dots, t+k$  dan berhubungan dengan aksi sinyal kendali optimal yang diperoleh  $U^* = \{u_1^*, \dots, u_{t+k|t}^*\}$ . Masukan input kendali pertama  $u_t = u_t^*$  dan terus diulangi lagi pada  $t+1$ , pada kondisi baru  $x_{t+1}$ .

Gain umpan balik  $K$  dan fungsi terminal biaya matriks  $P$  sering digunakan untuk menjamin stabilitas MPC untuk persamaan (2.21). Ada dua cara untuk mendapatkan  $K$  dan  $P$ . Cara pertama dengan memilih  $K = 0$  dan  $P$  dapat diperoleh dari Persamaan Lyapunov diskrit

$$P = A' P A + Q$$

Cara penyelesaian tersebut hanya berlaku loop sistem terbuka dan stabil, dengan masukan kendali dihentikan setelah langkah  $N_u$ . Cara kedua mendapatkan  $K$  dan  $P$  untuk kondisi tanpa ada batasan (unconstraint), dengan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) ketika  $N_u = N_y = N_c = \infty$

$$\begin{aligned} K &= -(R + B'PB)^{-1}B'PA \\ P &= (A + BK)'P(A + BK) + K'RK + Q \end{aligned} \quad (2.22)$$

Cara ini paling populer untuk memperoleh matrik  $K$  dan  $P$ .

Memperkenalkan hubungan, yang diturunkan dari persamaan (2.19)

$$x_{t+k|t} = A^k x_t + \sum_{j=0}^{k-1} A^j B u_{t+k-1-j} \quad (2.23)$$

Persamaan (2.21) dapat dinyatakan dalam *Quadratic Programming* (QP) sebagai berikut

$$\begin{aligned} J^*(x_t) &= \min_U \left\{ \frac{1}{2} U' H U + x_t' F U + \frac{1}{2} x_t' Y x(t) \right\} \\ \text{batasan} \quad & G U \leq W + E x_t \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dengan  $U \triangleq [u_t', \dots, u_{t+N_u-1}']' \in \mathbb{R}^s$ ,  $s \triangleq m N_u$  adalah vektor dari variabel-variabel optimasi,  $H = H' > 0$  dan  $H, F, Y, G, W, E$  diperoleh dari  $Q, R$  dan dari persamaan (2.19)-(2.23). MPC diterapkan secara berulang untuk mendapatkan kondisi optimal *Quadratic Programming* persamaan (2.24) pada setiap waktu  $t \geq 0$  untuk pada nilai state  $x_t$  saat ini. Dengan rumusan ini, sinyal kendali optimal  $U^*$  dalam *QP* merupakan fungsi dari state  $x_t$  atau  $U^*(x_t)$  sehingga secara implisit dari persamaan (2.24) sinyal kontrol  $u_t$  dinyatakan sebagai berikut

$$u_t = [I \quad 0 \quad \dots \quad 0] U^*(x_t) \quad (2.25)$$

Persamaan (2.24) merupakan perumusan MPC sebagai yang dioptimasi dengan *QP* biasanya diselesaikan secara online sehingga memerlukan komputasi yang cukup



berat. Persamaan (2.21) dapat diselesaikan melalui pemrograman multiparametric untuk yang menghindari optimisasi yang berulang, metode ini pertama kali diperkenalkan [ 13, 14, 15].

## 2.4 Pemrograman Multiparametric

Penyelesaian optimasi dengan multiparametrik dilakukan dengan melakukan tranformasi linear pada persamaan (2.26) dengan  $z \in \mathbb{R}^s$

$$z \triangleq U + H^{-1}F'x_t \quad (2.26)$$

Sehingga persamaan (2.23) dirumuskan ke dalam *multi parametric Quadratic Programming* (mp-QP) menjadi

$$\begin{aligned} V_z(x_t) &= \min_z \frac{1}{2} z' H z \\ \text{batasan} \quad &Gz \leq W + Sx_t \end{aligned} \quad (2.27)$$

dengan  $z \in \mathbb{R}^s$ . = vektor variabel optimasi,  $x_t$  adalah vektor parameter, dan

$$S = E + GH^{-1}F' \quad (2.28)$$

Perhatikan persamaan (2.23) vektor state  $x_t$  berada disisi kanan pada fungsi tujuan dan pada batasan (constraint), sedangkan pada persamaan (2.28) hanya muncul pada sisi kanan. Keuntungan utama penulisan persaman (2.19) ke dalam persamaan (2.28) adalah bahwa  $z$  (dan hal ini  $U$ ) dapat diperoleh sebagai fungsi affine dari  $x$  untuk space yang layak dari  $x$ .

Optimasi variabel  $z(x)$  dapat diperoleh dari fungsi affine pada state  $x_t$  dengan memanfaatkan orde pertama *Karush-Kuhn Tucker* (KKT) untuk kondisi persamaan (2.27). Kondisi orde pertama KKT untuk mp-QP persamaan (2.27) dengan diberikan oleh

$$Hz + G'\lambda = 0 \quad (2.29)$$

$$\lambda_i(Gz - W_i - S_i x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (2.30)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (2.31)$$

Dari persamaan (2.32) dapat ditulis

$$z = -H^{-1}G'\lambda \quad (2.32)$$

Dengan  $\hat{\lambda}$  pengkali lagrange untuk batasan tidak aktif,  $\tilde{\lambda}$  = pengkali lagrange untuk batasan aktif. Untuk batasan yang tidak aktif maka  $\hat{\lambda} = 0$ . Untuk batasan yang aktif dinyatakan dalam persamaan (2.33)

$$(\tilde{G}z - \tilde{W}_i - \tilde{S}_i x) = 0 \quad (2.33)$$

dengan  $\tilde{G}$ ,  $\tilde{W}_i$ , dan  $\tilde{S}_i$  berhubungan dengan himpunan batasan aktif. Dari persamaan (2.32) dan (2.33)

$$\tilde{\lambda} = -(\tilde{G}H^{-1}\tilde{G}')^{-1}(\tilde{W} + \tilde{S}x) \quad (2.34)$$

Terlihat  $(\tilde{G}H^{-1}\tilde{G}')$  ada karena asumsi *Linear Independent Constraint Qualificatin* (LICQ). Jadi  $\lambda$  adalah fungsi affine dari  $x$ , subsitusikan  $\tilde{\lambda}$  dari persamaan (2.34) ke dalam persamaan (2.32) didapat

$$z = H^{-1}\tilde{G}'(\tilde{G}H^{-1}\tilde{G}')^{-1}(\tilde{W} + \tilde{S}x) \quad (2.35)$$

Dan terlihat bahwa  $z$  merupakan fungsi affine dari  $x$ .

Untuk masalah yang didalam persamaan (2.27), dengan  $x$  nilai vektor parameter dan  $(x_0, \lambda_0)$  sepasang KKT,  $\lambda_0 = \lambda(x_0)$  adalah vektor pengali Lagrange tidak negatif, dan  $z_0 = z(x_0)$  didapat hubungan

$$\begin{bmatrix} z(x) \\ \lambda(x) \end{bmatrix} = -(M_0)^{-1}N_0(x - x_0) + \begin{bmatrix} z_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$M_0 = \begin{pmatrix} H & G_1^T & \dots & G_q^T \\ -\lambda_1 G_1 & -V_1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -\lambda_p G_p & & & -V_q \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$$N_0 = (Y, \lambda_1 S_1, \dots, \lambda_p S_p)^T \quad (2.38)$$

dengan  $G_i$  baris  $G$ ,  $S_i$  baris  $S$ , maka  $V_i = G_i z_0 - W_i - x_0 S_i$ ,  $W_i$  baris ke- $W$ , dan  $Y$  adalah matriks null dimensi  $(s \times n)$ . Dengan matrik  $G_i, E_i$  dan  $W_i$  didefinisikan sebagai berikut

$$G_i = \begin{bmatrix} A_u & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_u & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_u \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_x B & 0 & \dots & 0 \\ A_x A B & A_x B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_f A^{N-i-1} B & A_x A^{N-i-2} B & \dots & A_x B \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -A_x \\ -A_x A \\ -A_x A^2 \\ \vdots \\ -A_f A^{N-i} \end{bmatrix}, \quad W_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_u \\ \vdots \\ b_u \\ b_x \\ b_x \\ b_x \\ \vdots \\ b_f \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Dengan  $A_x x \leq b_x$ ,  $A_f x \leq b_f$ ,  $A_u u \leq b_u$  untuk anggota  $U, X, X_f$ , sebagai fungsi batasan

Diberikan  $z_0, \lambda_0$  untuk vektor parameter khusus  $x_0$ , satu penyelesaian didapat  $z(x), \lambda(x)$ , untuk vektor parameter vektor  $x$  dari persamaan (2.36). Optimasi variabel  $z$  akan menghasilkan urutan kendali  $U$  linear, fungsi affine dari state  $x, z(x), dan U(x)$ . Dengan cara ini urutan aksi kendali diperoleh secara eksplisit fungsi dari state.

Himpunan penyelesaian  $x$  dari persamaan (2.36) adalah optimal didefinisikan sebagai daerah kritis ( $CR^0$ ). Dearah kritis tersebut diperoleh sebagai berikut

- (i) Substitusikan  $z(x)$  kedalam batasan tidak aktif didalam persamaan (2.27)
- (ii) Dari kepositifan dari pengali Lagrange sesuai dengan batasan aktif, adalah

$$CR^R = \{\check{G}z(x) \leq \check{W} + \check{S}x(t), \check{\lambda}(x) \geq 0\} \quad (2.41)$$

$CR^R$  mewakili himpunan ketidaksamaan, kemudian  $CR^0$  diperoleh dengan menghilangkan batasan redundant dari  $CR^R$  sebagai berikut:

$$CR^0 = \Delta\{CR^R\} \quad (2.42)$$

$\Delta$  merupakan operator memindahkan batasan redundant, cara mengidentifikasi batasan redundant dapat dilihat lihat referensi[20]. Ruang variabel keadaan  $X$ , yang ditandai hanya satu himpunan bagian  $X$ , yaitu,  $R^0 \subseteq X$ , sisa daerah dinyatakan sebagai  $CR^{rest}$  diperoleh sebagai berikut:

$$CR^{rest} = X - CR^0 \quad (2.43)$$

Cara diatas diulang lagi mulai dari persamaan (2.36) sampai (2.43) untuk himpunan  $z(x), \lambda(x)$  yang berhubungan dengan  $CR^0$  akan diperoleh. Cara ini akan berakhir sampai tidak ada daerah sisa yaitu ketika  $CR^{rest} = \emptyset$ . Untuk daerah yang memiliki solusi yang sama dapat digabung

Algoritma untuk solusi mp-QP dari untuk persamaan (2.27) dalam menghitung  $U$  sebagai fungsi affine dari  $x$  dan karakterisasi  $X$  dengan himpunan daerah polyhedral,  $CR^0$ , diringkas dalam Tabel 2.1. Urutan optimal kontrol  $U^*(x)$ , sekali  $z(x)$  didapat dengan (2.36).

$$U^*(x) = z(x) - H^{-1}F'x \quad (2.44)$$

Akhirnya, aturan kendali umpan balik

$$u_i = [I \ 0 \ \dots \ 0]U^*(x_t) \quad (2.45)$$

Yang diimplementasikan ke sistem, algoritma pada Tabel 2.1 didapat daerah  $CR^s$  sebagai himpunan bagian  $X$  dari ruang keadaan.

Tabel 2.1 Algoritma *Multiparametrik Quadratic Programming* ( mp-QP .)

1	Ditentukan ruang (space) space $x$ untuk diselesaikan persamaan (2.27) dengan $x$ sebagai variabel bebas dan sehingga diperoleh $[x_0]$
2	Didalam (2.27) pilih $x = x_0$ dan menyelesaikan persamaan (2.27) sehingga didapat $[z_0, \lambda_0]$
3	Dari persamaan(2.36) didapat $[x(x), \lambda(x)]$
4	Tentukan $CR^R$ yang diberikan dalam persamaan (2.41).
5	Dari $CR^R$ hapus ketidaksamaan redundant dan definisikan daerah optimalitas $CR^0$ yang diberikan pada persamaan (2.42)
6	Tentukan sisa daerah $CR^{rest}$ , seperti yang diberikan dalam (2.43)
7	Jika tidak ada daerah yang lebih yang bisa eksplorasi lagi, terus ke berikutnya, jika tidak lanjutkan kembali ke step 1
8	Kumpulkan semua solusi dan satukan kombinasi cembung dari daerah memiliki solusi sama sehingga didapat solusi yang kompak.

Oleh karena itu, MPC dapat diimplementasikan dengan menerapkan online aturan heuristik:

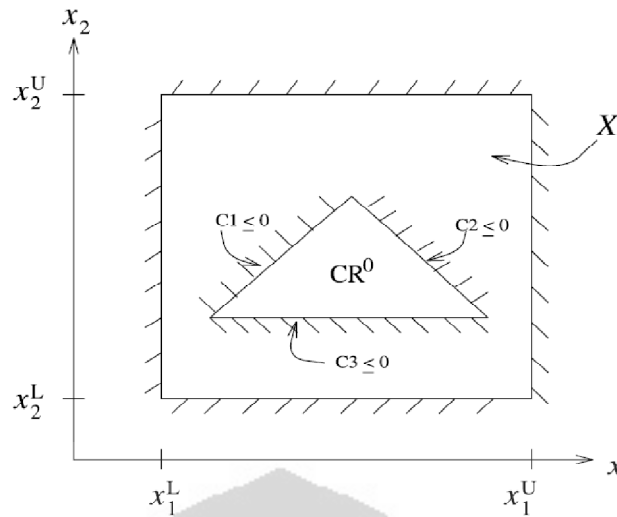
1. Lakukan pengukuran state  $x$  pada waktu saat ini
2. Memperoleh daerah  $CR^0$  di mana  $x$  berasal, yaitu,  $x \in CR^0$
3. Ambil aksi kontrol  $u_t$  dari persamaan (2.45) dan diterapkan pada sistem
4. Ulangi lagi dengan pengambilan sampel berikutnya.

Dengan demikian, optimasi online MPC (2.21) berkurang sebagai berikut fungsi sederhana evaluasi skema:

$$\text{if } x \in CR^0 \text{ sehingga } u_i = [I \ 0 \ \dots \ 0]U^*(x_t)$$

Kemudian, tindakan kontrol yang sesuai dapat dihitung dengan menggunakan fungsi evaluasi yang berhubungan affine function

Sisa daerah  $CR^{rest}$  dapat dihitung sebagai himpunan bagian dari  $X$  pada daerah optimal  $CR^0 \subseteq X$ , yaitu,  $CR^{rest} = X - CR^0$ . Perhatikan Gambar 2.6 untuk dua state variabel  $x_1$  dan  $x_2$ , dan  $X$  didefinisikan oleh Ketidaksamaan:  $X \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_1^L \leq x_1 \leq x_1^U, x_2^L \leq x_2 \leq x_2^U\}$  dan  $CR^0$  didefinisikan oleh ketidaksamaan:  $CR^0 \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \mid C1 \leq 0, C2 \leq 0, C3 \leq 0\}$  dengan  $C1, C2$ , dan  $C3$  merupakan fungsi linier dari  $x$



Gambar. 2.6 Daerah kritis, X dan  $CR^0$

Prosedur ini melibatkan satu persatu ketidak-samaan yang menentukan  $CR^0$ . Misalnya, ketidak-samaan  $C1 \leq 0$ , sisa daerah tersebut diberikan oleh

$$CR_1^{rest} \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \mid C1 \geq 0, x_1^L \leq x_1, x_2 \leq x_2^U\}$$

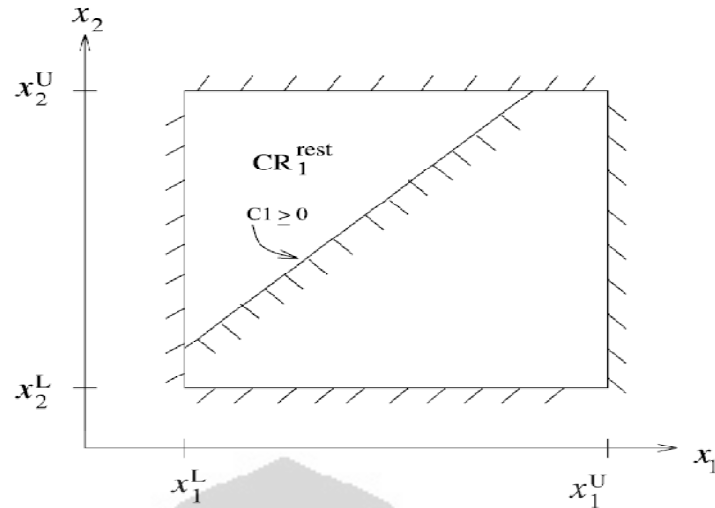
Dengan membalik tanda ketidak-samaan  $C1 \leq 0$  dan menghapus batasan redundant X seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 sisa lengkap daerah ini diberikan oleh

$$CR^{rest} = \{CR_1^{rest} \cup CR_2^{rest} \cup CR_3^{rest}\}$$

dengan  $CR_1^{rest}$ ,  $CR_2^{rest}$ , dan  $CR_3^{rest}$  diberikan dalam Tabel 2.2 dan secara grafik pada Gambar 2.7 Perhatikan ketika X tak terbatas, cukup menekan di ketidak-samaan yang menyangkut X dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Definisi sisa seluruh daerah.

Daerah	Ketidak-samaan				
$CR_1^{rest}$	$C_1 \geq 0$	$x_1^L \leq x_1$	$x_2 \leq x_2^U$		
$CR_2^{rest}$	$C_1 \leq 0$	$C_2 \geq 0$	$x_1 \leq x_1^U$	$x_2 \leq x_1^U$	
$CR_3^{rest}$	$C_1 \leq 0$	$C_2 \geq 0$	$C_3 \geq 0$	$x_1^L \leq x_1 \leq x_1^U$	$x_2^L \leq x_2$



Gambar. 2.7 Reversing tanda ketidaksamaan  $C1$  untuk memperoleh  $CR_1^{rest}$  [ ]

## 2.5 Reference Tracking

Dalam tracking referensi tujuannya output dapat mengikuti perubahan setpoint sesuai dengan tracking referensi. bervariasi dalam waktu. Tujuannya meminimalkan error antara  $y(t)$  output sistem dan sinyal referensi  $r(t)$

Formulasi umum MPC untuk pelacakan referensi

$$\min_U J(U, x_t, r_t) = \sum_{k=0}^{N_y-1} (y_{t+k|t} - r_t)' Q (y_{t+k|t} - r_{t+k}) + \delta u_{t+k}' R \delta u_{t+k}$$

batasan

$$\begin{aligned} y_{min} &\leq y_{t+k|t} \leq y_{max} & k = 1, \dots, N_c \\ u_{min} &\leq u_{t+k|t} \leq u_{max} & k = 0, 1, \dots, N_c \\ \delta u_{min} &\leq \delta u_{t+k|t} \leq \delta u_{max} & k = 0, 1, \dots, N_u - 1 \\ x_{t|t} &= x_t \\ x_{t+k+1|t} &= Ax_{t+k|t} + Bu_{t+k|t}, & k \geq 0 \\ y_{t+k|t} &= Cx_{t+k|t}, & k \geq 0 \\ u_{t+k} &= u_{t+k-1} + \delta u_{t+k}, & k \geq 0 \\ \delta u_{t+k} &= 0, & k \geq N_u \end{aligned} \tag{2.46}$$

dengan  $U \triangleq \{\delta u_t, \dots, \delta u_{t+N_{u-1}}\}$ ,  $r_t \triangleq \{r_{t_t}, \dots, r_{t+N_{y-1}}\}$  dan  $\delta u \in \mathbb{R}^m$ .  
 Persamaan  $u_{t+k} = u_{t+k-1} + \delta u_{t+k}$  sama dengan menjumlahkan integrator dalam loop kontrol.

Pelacakan referensi pelacakan MPC (2.41) dapat dirumuskan menjadi sebuah masalah mp-QP seperti masalah regulasi (2.21), dengan menggunakan prosedur yang sama dijelaskan dalam (2.19). Jumlah parameter meningkat tidak saja state  $x$ , tapi ada tambahan input masa lalu  $u_{t-1}$  dan referensi  $r$ .

$$J^*(x_t, u_{t-1}, r_t) = \min_U \left\{ \frac{1}{2} U' H U + [x_t' u_{t-1}' r_t'] F U \right\}$$

$$\text{batasan } G U \leq W + E \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r_t' \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

dan akhirnya ke dalam masalah mp-QP

$$V_z(x_t) = \min_z \frac{1}{2} z' H z$$

batasan

$$G z \leq W + S \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r_t' \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

dengan  $z = U + H^{-1} F' \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r_t' \end{bmatrix}$  dan  $S = E + G H^{-1} F'$

Algoritma mp-QP pada tabel 1.1 digunakan untuk menyelesaikan persamaan (2.42). Penyelesaian persamaan (2.42)  $U$  linier terhadap piecewise affine fungsi  $U(x_t, u_{t-1}, r_t)$  dari  $x_t, u_{t-1}, r_t$  yang didefinisikan sejumlah daerah  $CR^0$  dimana solusi ini berlaku. Sinyal kendali yang dipakai dalam dinyatakan sebagai berikut:

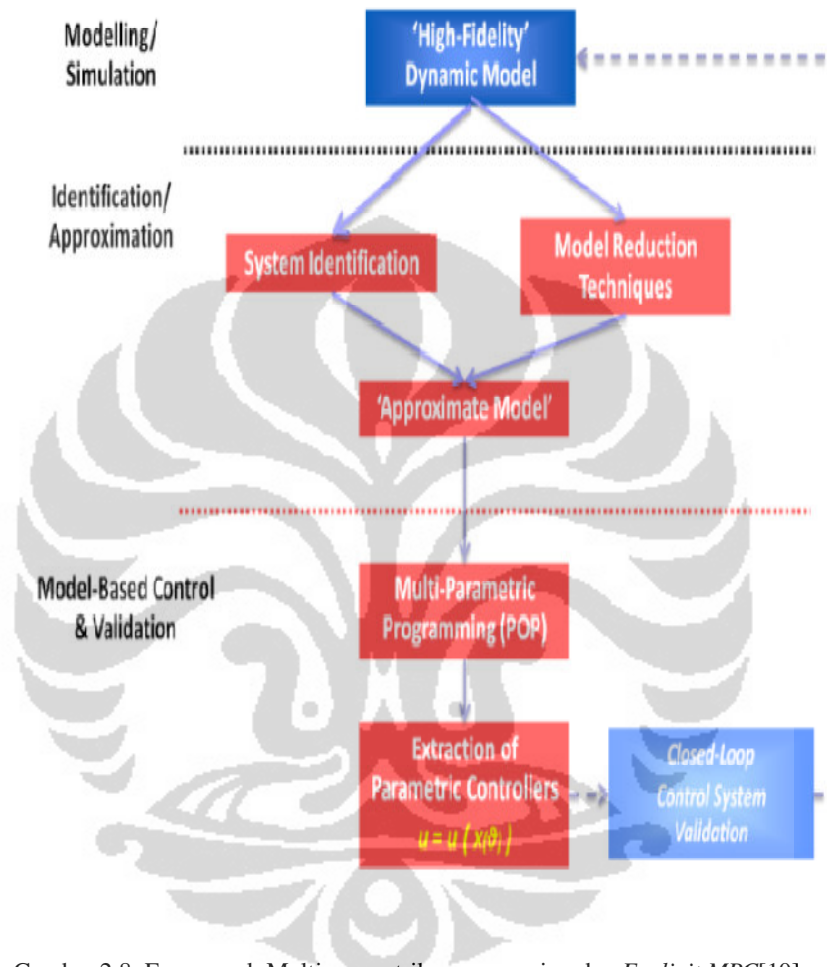
$$u_t = u_{t-1} + \delta u_t(x_t, u_{t-1}, r_t)$$

dengan  $\delta u_t(x_t, u_{t-1}, r_t)$  adalah komponen pertama dari vektor  $U(x_t, u_{t-1}, r_t)$



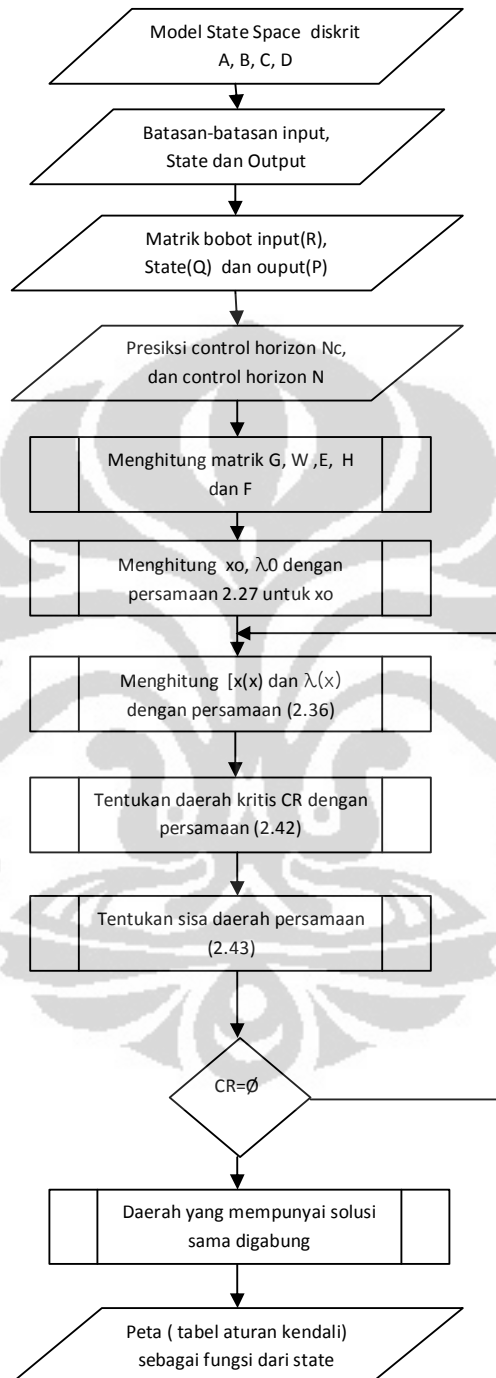
## 2.6. Flowchart

Berikut ini kerangka kerja flowchart framework pembuatan kendali Explicit-MPC dengan pemrograman multiparametrik[10].



Gambar 2.8. Framework Multiparametrik programming dan *Explicit MPC*[10]

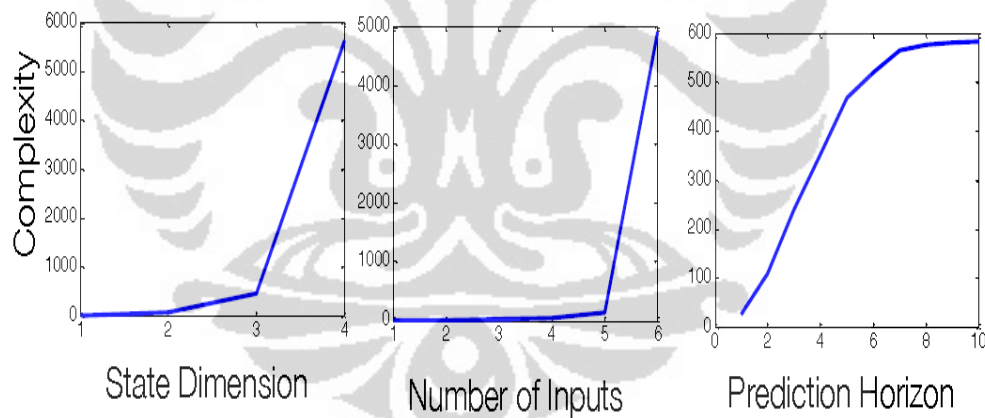
Sedangkan flowchart untuk model Based Control dengan Multiparametrik programming adalah sebagai berikut



Gambar 2.9. Flowchart mendapatkan mapping control

Dalam desain kendali *Explicit-MPC* harus ditentukan dengan benar batasan dari state, input dan output karena akan menentukan daerah layak dari sistem tersebut. Daerah layak didefinisikan sebagai himpunan daerah dari state yang memenuhi semua batasan tersebut. Misalnya dalam aplikasinya didapatkan output diluar dari batasan maka tidak sinyal kendali dan kondisi tidak stabil. Untuk itu dilakukan optimasi ulang dengan merubah batasan output untuk mendapatkan tabel aturan kendali yang baru. Besarnya nilai sinyal kendali pada state dapat diperoleh dengan menggunakan interpolasi tabel aturan kendali tersebut.

*Explicit-MPC* efektif digunakan pada model dengan jumlah state maksimum empat, jika lebih dari empat state maka komputasi optimasi menjadi lama dan kompleks. Gambar 2.30 menunjukkan hubungan antara state, input dan prediksi horizon terhadap kompleksitas komputasi dengan menggunakan multiparametric programming



Gambar 2.10. Hubungan antara state, banyaknya input dan prediksi horizon terhadap kompleksitas komputasi[13]

Desain *Explicit MPC* dilakukan dengan menggunakan *Multi-Parametric Toolbox (MPT)* yang dikembangkan oleh *Automatic Control Laboratory (ETH, Zurich, Swiss)*. Toolbox sifatnya open source dan menyediakan berbagai ragam algoritma optimas yang mudah digunakan dengan fungsi performansi yang berbeda misalnya linear, kuadratik dan waktu minimum. Hasil optimasi dapat

ditanam dalam sistem embedded dalam bentuk bahasa C, atau menggunakan Matlab™ dengan platform realtime windows target



## BAB III

### DESAIN KENDALI PRESSURIZER

#### 3.1 Parameter Pressurizer

Data-data pressurizer yang digunakan dalam pemodelan diambil dari data Reaktor AP1000 Whestinghouse, data termodinamika cairan dan uap air diambil dari Xstream®

Tabel 3.1 Data parameter Pressurizer AP1000 Whestinghouse [16]

No	Parameter	Nilai
1	Volume total ( $V_{tot}$ )	54 m <sup>3</sup>
2	Batas heater maksimum heater ( $\dot{Q}_{h,max}$ )	1.600 kW
3	Besar daya heater kontrol ( $\dot{Q}_h$ )	370 kW
4	Besar daya heater cadangan	1230 kW
5	Konversi ke level air ( A )	1/54 m <sup>2</sup>
6	Volume awal pressurizer ( $V_0$ )	27.5 m <sup>3</sup>
7	Laju massa Relief selama komputasi ( $\dot{m}_r$ )	0 kg/s
8	Enthalphi spray (hs) yang digunakan diasumsuikan pada temperatur 550°F	1344.8 kJ/kg
9	Tekanan awal pressurizer (p0)	154 bar

XSteam® merupakan tabel sifat termodinamika uap dan air yang dibuat oleh Magnus Holmgren, dari [www.x-eng.com](http://www.x-eng.com) berdasarkan "International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997" (IAPWS IF-97). XSteam® menyediakan data akurat sifat-sifat uap dan air berdasarkan standar IF-97 untuk jangkauan tekanan 0-1000 bar dan temperatur 0 - 2000°C. Data termodinamika yang disediakan XSteam® antara lain suhu, tekanan, entalpi, volume spesifik, densitas, spesifik entropi, energi internal spesifik, kapasitas panas spesifik isobarik, kapasitas panas isochoric, kecepatan suara, viskositas dan fraksi uap

### 3.2 Model

Model pressurizer satu fase dalam kesetimbangan seperti pada persamaan (4.1) merupakan model nonlinear. Model tersebut sudah divalidasi dengan percobaan hasil percobaan pressurizer MIT oleh Kim tahun 1984 [17]. Model dapat menggambarkan perilaku pressurizer pada saat *insurge* dan *outsurge*, besarnya rata-rata error kurang dari 10% [18].

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = M^{-1}N \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_s \\ \dot{m}_r \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dengan

$$M = \begin{bmatrix} a1 + a2V_2 & a3 \\ b1 + b2V_2 & b3 \end{bmatrix} \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} M \\ N \end{matrix}} \right\} (3.2)$$

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_i & h_s & -h_1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$a1 = \bar{\rho}_1 V_{tot}$$

$$a2 = \bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1$$

$$a2 = (\rho_2 - \rho_1)$$

$$b1 = (\bar{\rho}_1 h_1 + \rho_1 \bar{h}_1) V_{tot}$$

$$b2 = (\bar{\rho}_2 h_2 + \rho_2 \bar{h}_2 - \bar{\rho}_1 h_1 - \rho_1 \bar{h}_1)$$

$$b3 = (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

Model tersebut kemudian diimplementasikan dalam Matlab™ dan Simulink dengan algoritma dibawah ini. Berikut algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan (3.1)

1. Dari Inisialisasi variabel antara lain tabel XStream® ditentukan  $h_i$ ,  $h_1, h_2, \rho_1$  dan  $\rho_2$
2. Tentukan  $dp$  dan  $dt$

3. Hitung turunan dari  $h_1, h_2, \rho_1$  dan  $\rho_2$  terhadap  $dp$
4. Hitung koefisien matrik pengaturan  $M$  dan  $N$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = M^{-1}N \begin{bmatrix} \dot{m}_i \\ \dot{m}_s \\ \dot{Q}_h \end{bmatrix}$$

Hitung matrik fungsi alih  $G(p, V_2, V_{tot}) = M^{-1}N$

5. Tentukan volume air dan tekanan
6. Diulangi lagi dari langkah 4 dan 6
7. Selesai

### 3.3 Model Linear

Desain kendali dalam sistem non linear sangat sulit, biasanya desain kendali sistem akan lebih mudah jika dilakukan pada sistem liner. Linearisasi pada titik operasi yang dilakukan menggunakan pendekatan numerik. Hal ini dilakukan karena penyelesaian analitis sulit dilakukan karena adanya variabel densitas dan entalpi air dan uap yang harus diambil dari tabel termodinamika air dan uap [18].

Linerisasi dilakukan pada titik operasi normal operasi pressurizer pada tekanan 154 bar dan 356C, dengan memberikan masukan step yang kecil pada surge ( $\Delta \dot{m}_i = 0.1 \text{ kg/s}$ ), spray ( $\Delta \dot{m}_s = 0.1 \text{ kg/s}$ ) dan heater ( $\Delta \dot{Q}_h = 0.1 \text{ kW}$ ), maka didapat persamaan state space

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \quad (3.3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Dengan dengan  $w(t)$  sebagai gangguan surge ( $\dot{m}_i$ ) dan  $G$  matrik gangguan surge. Hasil linearisasi sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{p}(t) \\ \dot{V}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.365e-04 & 1.708e-03 \\ 9.107e-04 & -5.701e-03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.406e-05 & -1.166e-03 \\ 9.148e-07 & 1.943e-03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_h(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4.694e-03 \\ 2.324e-03 \end{bmatrix} \dot{m}_i(t)$$

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dengan besar matrik A, B, C, D dan G sebagai berikut

$$A = \begin{bmatrix} -3.365e-03 & 1.708e-03 \\ 9.107e-04 & -5.701e-03 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.406e-05 & -1.166e-03 \\ 9.148e-07 & 1.943e-03 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 4.694e-03 \\ 2.324e-03 \end{bmatrix}$$

Untuk mendesain kendali dengan *Explicit-MPC* diperlukan model dalam bentuk diskrit. Sehingga model linear kontinyu persamaan (3.4) didiskritisasi dengan waktu sampling  $T_s = 1$  didapat state space diskrit

$$\dot{x}(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + G_d w(k)$$

$$y(k) = C_d x(k) + D_d u(k)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}(k+1) \\ \dot{V}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.999 & 1.707e-04 \\ 9.067e-04 & 0.999 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k) \\ V_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.406e-05 & -1.166e-03 \\ 9.148e-07 & 1.943e-03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_n(k) \\ \dot{m}_s(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4.694e-03 \\ 2.324e-03 \end{bmatrix} \dot{m}_t(k)$$

$$\begin{bmatrix} p(k) \\ V_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k) \\ V_2(k) \end{bmatrix}$$
(3.5)

Sehingga matrik

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.999 & 1.707e-04 \\ 9.067e-04 & 0.999 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 1.406e-05 & -1.166e-03 \\ 9.148e-07 & 1.943e-03 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

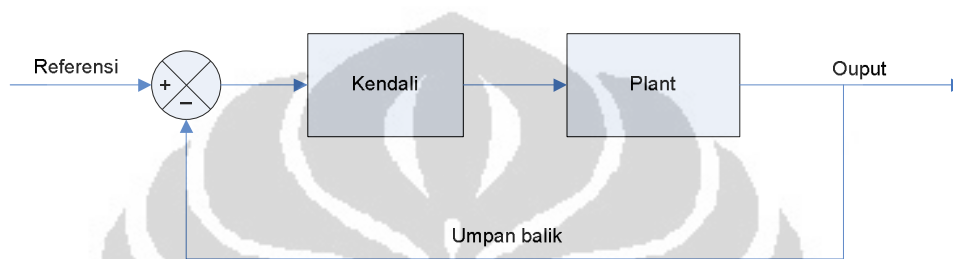
$$D_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$



$$G_d = \begin{bmatrix} 4.694e-03 \\ 2.324e-03 \end{bmatrix}$$

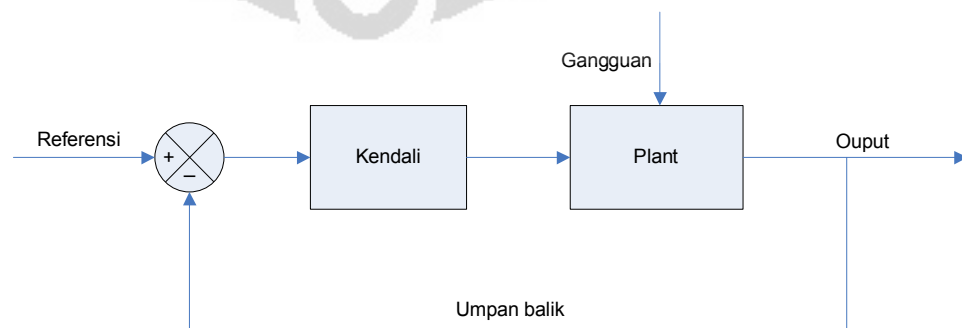
### 3.3 Desain Kendali

Sistem kendali yang ingin dibuat adalah sistem kendali umpan balik dengan sinyal kendali dapat mengikuti tracking reference (*setpoint*) pada batasan-batasan tertentu. Besarnya batasan sinyal kendali heater dari 0-1600 kW dan spray dari 0-36 kg/s. Gambar 3.1 menunjukkan struktur kendali pressurizer untuk tracking reference



Gambar 3.1 Blok diagram struktur kendali untuk tracking reference

Kemudian sistem kendali kedua dapat menjaga tekanan akibat adanya gangguan surge baik adanya insurge maupun outsurge dan menjaga volume air sehingga heater tetap terendam dengan batasan (*constraint*) pada masukan heater, spray dan keluaran pressure dan volume. Gambar 3.2 menunjukkan blok diagram kendali pressurizer untuk menjaga tekanan terhadap gangguan surge perubahan laju aliran pendingin



Gambar 3.2. Blok diagram struktur kendali pada titik operasi terhadap gangguan

### 3.3.1. Syarat syarat desain kendali

Selanjutnya akan dianalisa apakah sistem dapat dikontrol (*controllable*) dan teramati (*observability*). Sistem disebut tidak tergantung linier bila determinan matriknya  $\neq 0$   $Con = [B \ AB]$  didapat rank  $Con = 2$ , maka sistem dapat dikontrol. Untuk sistem dapat teramati jika rank dari matrik  $O = [C \ CA]'$  terisi penuh dan nilai rank  $O = 2$  sehingga sistem dapat diamati

Agar pressurizer bekerja dengan baik yaitu dapat mengendalikan tekanan aliran pendingin primer pada harga konstan dengan cara menjalankan secara bergantian atau bersma kedua aktuator (*heater dan sprayer*) sehingga tekanan konstan sehingga tekanan sistem konstan. Sistem kendali harus dapat harus dapat bekerja sehemat mungkin. Sistem kendali yang memenuhi kriteria adalah LQR (*Linear Quadratik Regulator*) [19]. Masalah utama kendali LQR jika ada batasan pada masukan, state dan keluaran maka tidak akan diperoleh kendali yang optimal. Sehingga digunakan *Explicit-MPC* yang mempunyai sifat hampir sama dengan LQR dengan sinyal kendali diperoleh terlebih dahulu dengan menggunakan multiparametrik programming

### 3.3.2 Kendali LQR

Desain pertama kendali LQR adalah menjaga tekanan tetap pada titik operasi 154 bar dan volume  $27.5 \text{ m}^3$ , terhadap gangguan surge masuk (*insurge*), keluar (*outsurge*). Kendali LQR dilakukan dengan cara menghitung fungsi biaya dihitung dengan menggunakan persamaan Riccati

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x'(t) Q(t) x(t) + u'(t) R u(dt) ] dt \quad (3.6)$$

Besarnya matrik Q dan R menggunakan aturan Bryson's

$$Q = \frac{1}{x^2 \text{ max}}, \quad R = \frac{1}{u^2 \text{ max}}$$

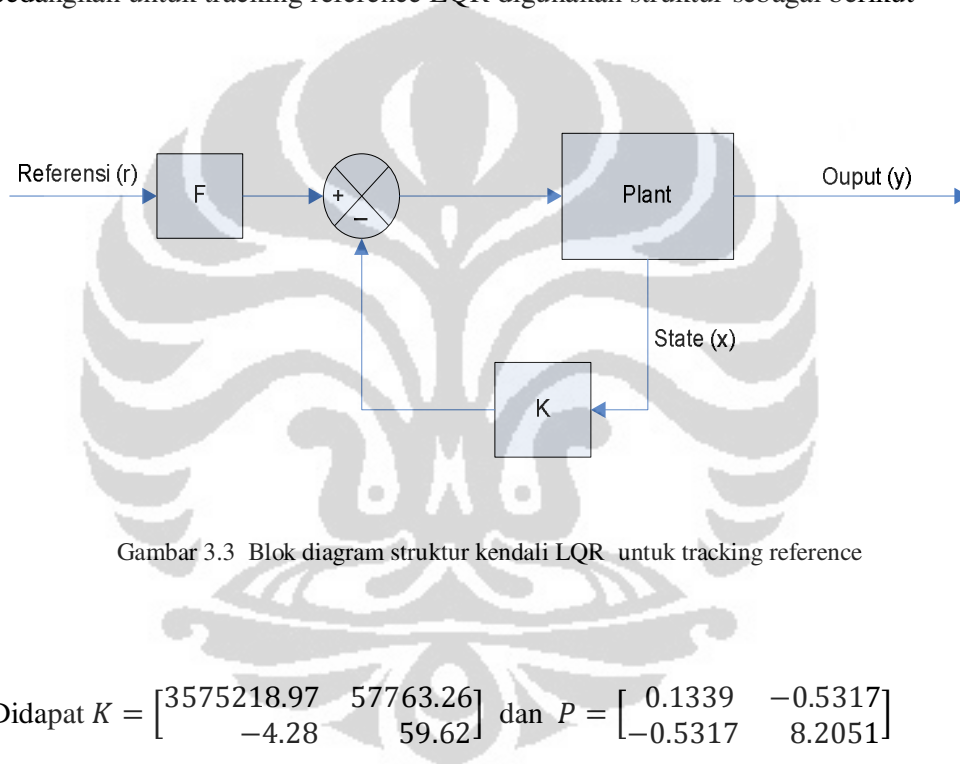
Jika tidak optimal maka dilakukan perubahan nilai matrik Q dan R secara trial and error sehingga didapat

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \text{ dan } R = \begin{bmatrix} 3.90625e-013 & 0 \\ 0 & 2.7777e-04 \end{bmatrix} \text{ besarnya nilai } K \text{ dan } P$$

dihitung dengan menyelesaikan persamaan Riccati didapat

$$\begin{aligned} K &= -(R + B'PB)^{-1}B'PA \\ P &= (A + BK)'P(A + BK) + K'RK \end{aligned} \quad (3.7)$$

Sedangkan untuk tracking reference LQR digunakan struktur sebagai berikut



Gambar 3.3 Blok diagram struktur kendali LQR untuk tracking reference

$$\text{Didapat } K = \begin{bmatrix} 3575218.97 & 57763.26 \\ -4.28 & 59.62 \end{bmatrix} \text{ dan } P = \begin{bmatrix} 0.1339 & -0.5317 \\ -0.5317 & 8.2051 \end{bmatrix}$$

Besarnya F dihitung dengan rumus

$$F = (K(A * B)^{-1} - I)(C(A * B)^{-1})' \quad (4.8)$$

$$\text{Dan didapat nilai sebesar } F = \begin{bmatrix} 1131117,25 & 3874,91 \\ -1,06 & 6,01 \end{bmatrix}$$

### 3.3.3 Kendali Explicit-MPC

Perancangan dengan menggunakan Explicit memerlukan model matematik dalam state space diskrit sehingga diperoleh dari linearisasi dengan  $T_s=1$  detik .

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.999 & 1.707e-04 \\ 9,067e-04 & 0,999 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 1.406e-05 & -1.166e-03 \\ 9.148e-07 & 1.943e-03 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_d = \begin{bmatrix} 4.694e-03 \\ 2.324e-03 \end{bmatrix}$$

Desain kendali *Explicit-MPC* dilakukan dengan menggunakan toolbox MPT. Tahap pertama menentukan nilai matrik  $Q$ ,  $R$  dan  $P$  yang ada fungsi performansi yang akan diminimalkan

$$\min_U J(U, x_t) = x'_{t+N_y|t} P x_{t+N_y|t} + \sum_{k=0}^{N_y-1} x'_{t+k|t} Q x_{t+k|t} + u'_{t+k} R u_{t+k}$$

Besar nilai :  $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ ,  $R = \begin{bmatrix} 3.90625e-013 & 0 \\ 0 & 2.7777e-04 \end{bmatrix}$  dan  $P = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

control horizon  $N_c = 2$  dan banyaknya titik prediksi horizon  $N_y = 5$  .

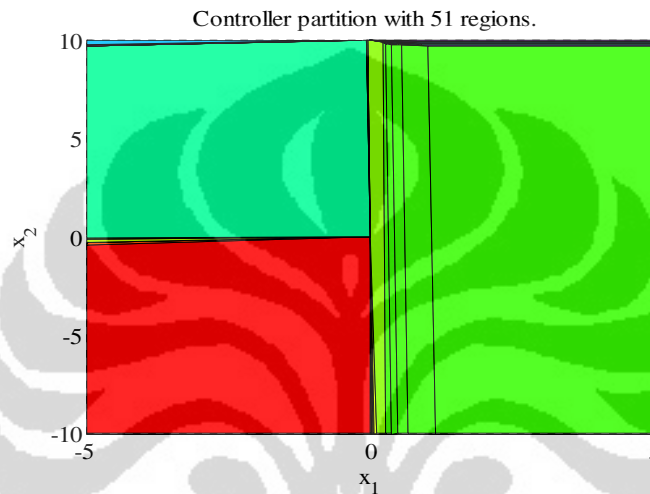
Batasan:

- heater  $0 \leq u_1 \leq 1600 \text{ kW}$  ,
- spray  $0 \leq u_2 \leq 36 \text{ kg/s}$ ,
- state output pressure  $-5 \leq x_1 \leq 5$ ,
- volume  $-10 \leq x_2 \leq 10$

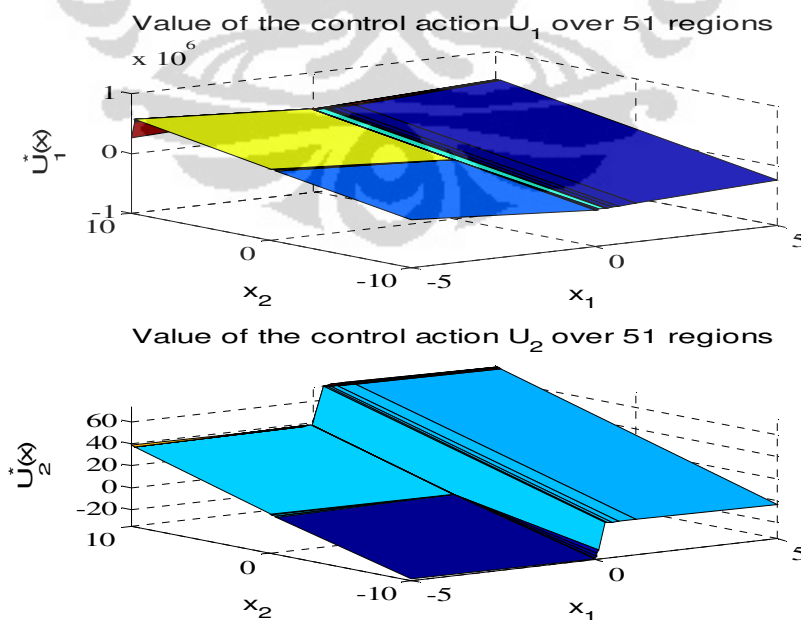
Setelah itu dilakukan penghitungan besarnya sinyal kendali sebagai fungsi dari pressure dan volume dalam bentuk peta kontrol. Dimana sinyal kendali akan dipartisi dalam beberapa daerah sebagai fungsi dari state. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan mutiparametrik kwadratik programming dengan

MPT toolbox. Peta kendali tersebut digabung dengan model untuk dapat dilakukan simulasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.

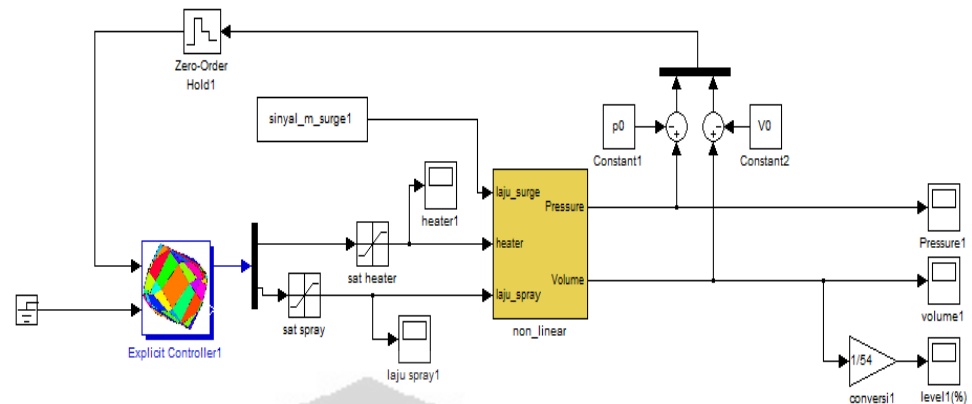
Desain pertama kendali *Explicit-MPC* untuk menjaga tekanan tetap pada titik operasi 154 bar dan volume  $27.5 \text{ m}^3$ , terhadap gangguan surge. Dengan menggunakan MPT toolbox didapat partisi controller 51 daerah, ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan sinyal kendali heater ( $u_1$ ) dan spray ( $u_2$ ) seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Pembagian peta kendali daerah sebagai fungsi state  $x_1$  (pressure) dan  $x_2$  (volume air)



Gambar 3.5 Sinyal kendali  $u_1$  (heater) dan  $u_2$  (spray) sebagai fungsi dari state



Gambar 3.6. Explicit MPC dengan Saturated heater dan Spray pada Model Nonlinear

Desain untuk tracking reference yang juga dilakukan multiparametrik toolbox dengan bobot output  $P = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  sehingga didapat sistem yang stabil.

## BAB IV

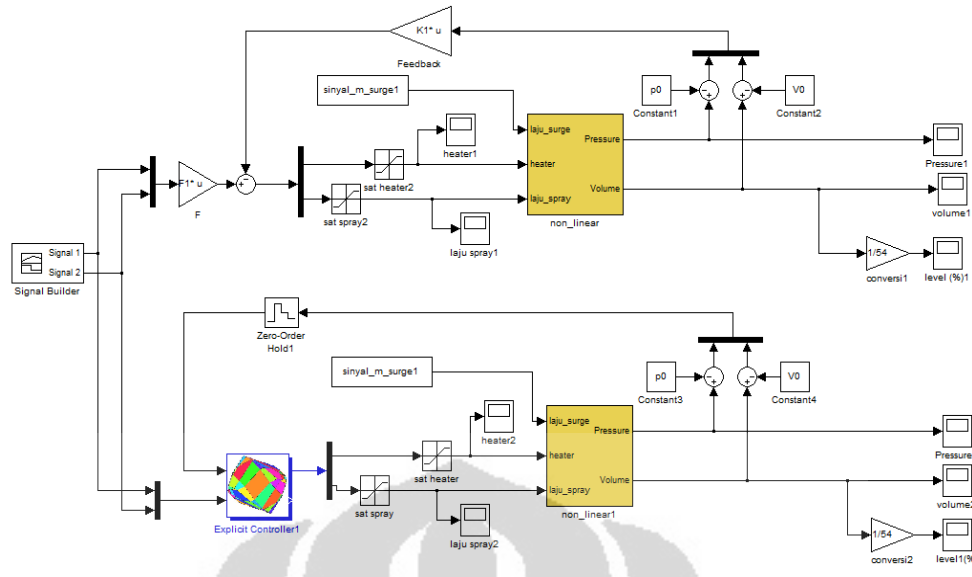
### SIMULASI DAN PENGUJIAN

Pengujian kendali dilakukan untuk melihat seberapa besar efektifitas *Explicit-MPC* dan *LQR* dengan saturasi dalam mengendalikan tekanan dan level air pressurizer. Ada dua jenis simulasi kendali pressurizer simulasi tanpa gangguan apakah tekanan dapat mengikuti perubahan setpoint (*tracking reference*) dan volume air masih dalam jangkauan aman  $17.5\text{m}^3 - 37.5\text{m}^3$  sehingga heater masih ada didalam air dan masih ada ruang untuk uap air. Pengendalian dilakukan dengan cara mengatur kerja secara bergantian heater dan sprayer.

Simulasi kedua dilakukan untuk menjaga tekanan presurizer tetap konstan pada titik operasi terhadap perubahan surge baik itu insurge, outsurge dan random. Dilakukan juga pengujian dengan menggunakan surge yang diambil dari data operasi PWR. Pada percobaan ini diakan dilihat apakah sistem kendali *LQR* dan *Explicit-MPC* dapat mempertahankan tekanan terhadap gangguan surge perubahan aliaran pendingin

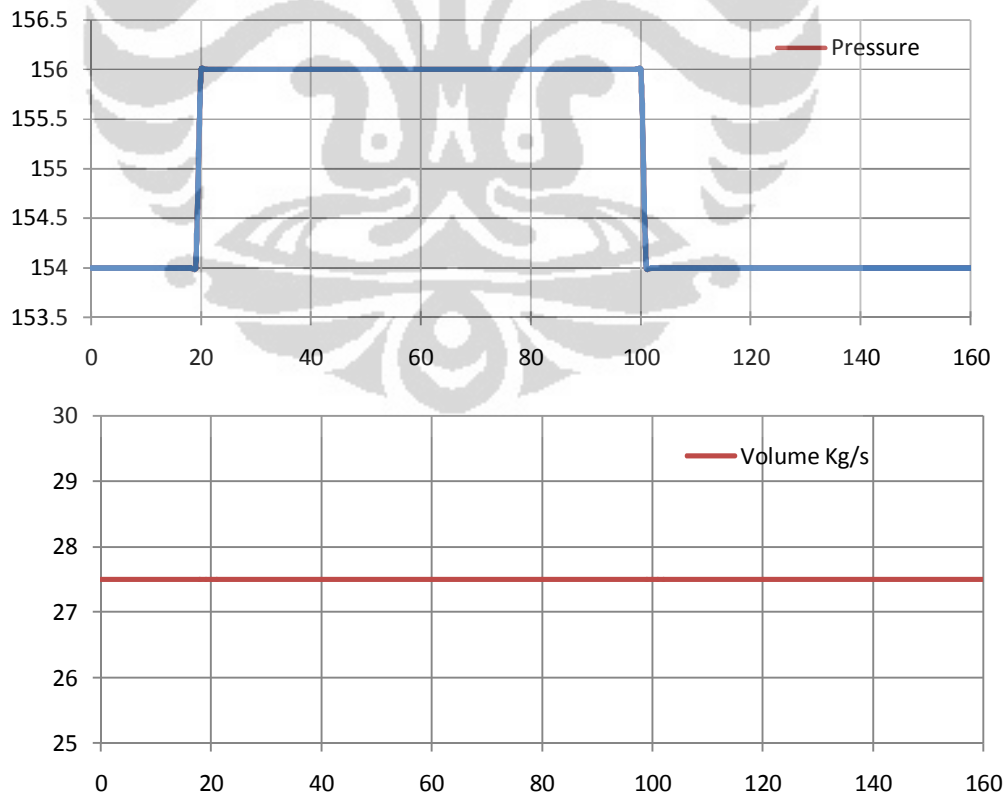
#### 4.1 Simulasi Tanpa Gangguan

Desain kedua kendali *Explicit-MPC* adalah *tracking reference*, diharapkan keluaran dapat mengikuti referensi yang sudah ditentukan. Ini diperlukan jika suatu ingin menaikkan dan menurunkan tekanan. Gambar 4.1 menunjukkan blok simulink untuk *Explicit-MPC* dan *LQR*



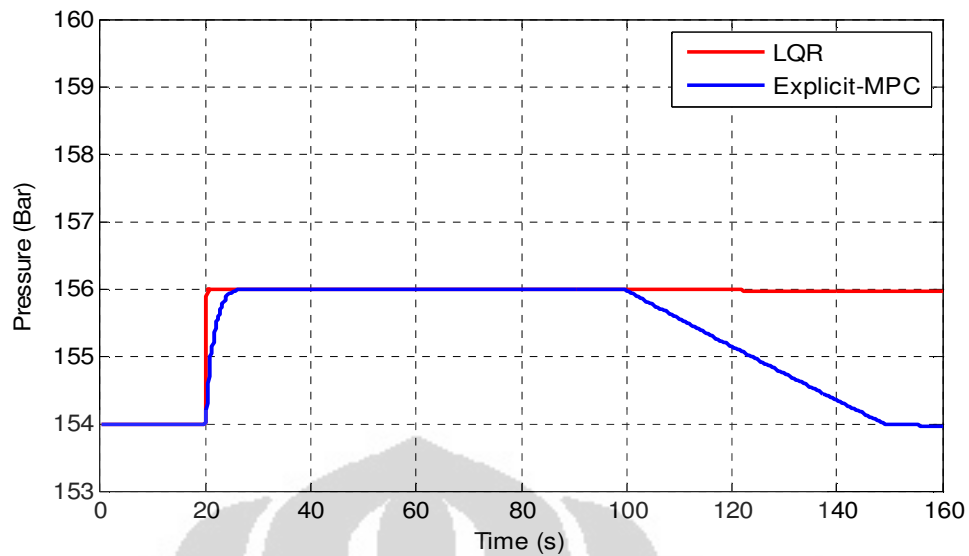
Gambar 4.1. Perbandingan *Explicit MPC* dan *LQR* untuk tracking

Dengan referensi sebagai berikut

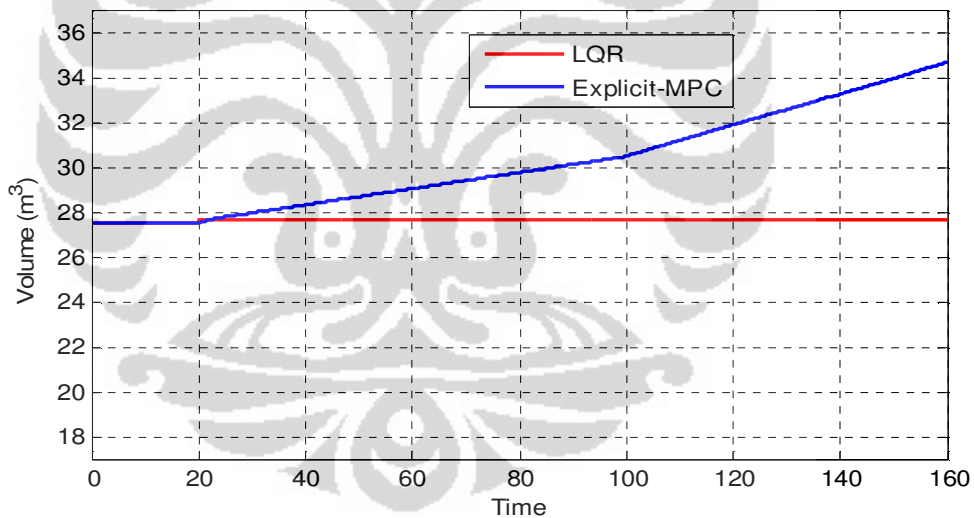


Gambar 4.2. Sinyal referensi tekanan dan volume air





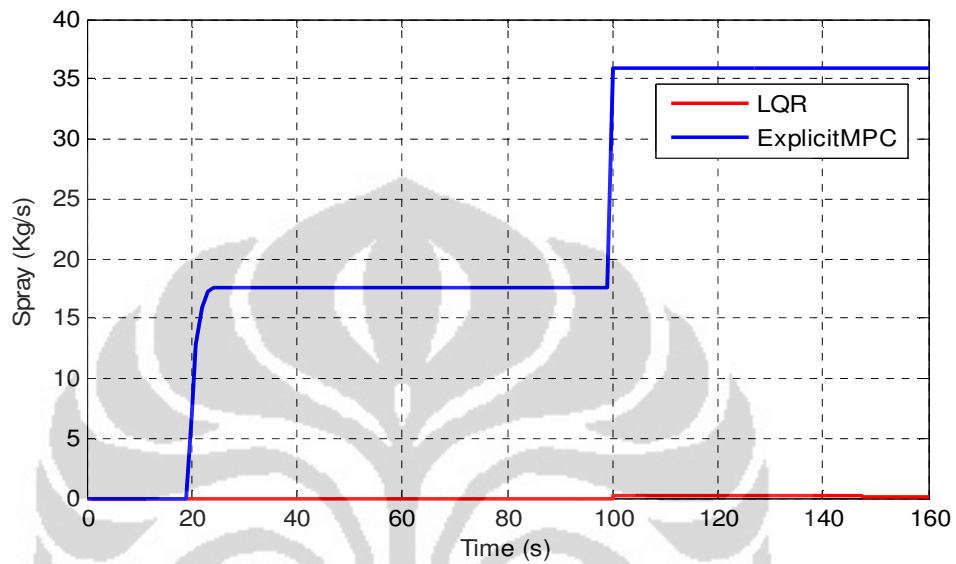
Gambar 4.3. Keluaran Pressure antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking reference



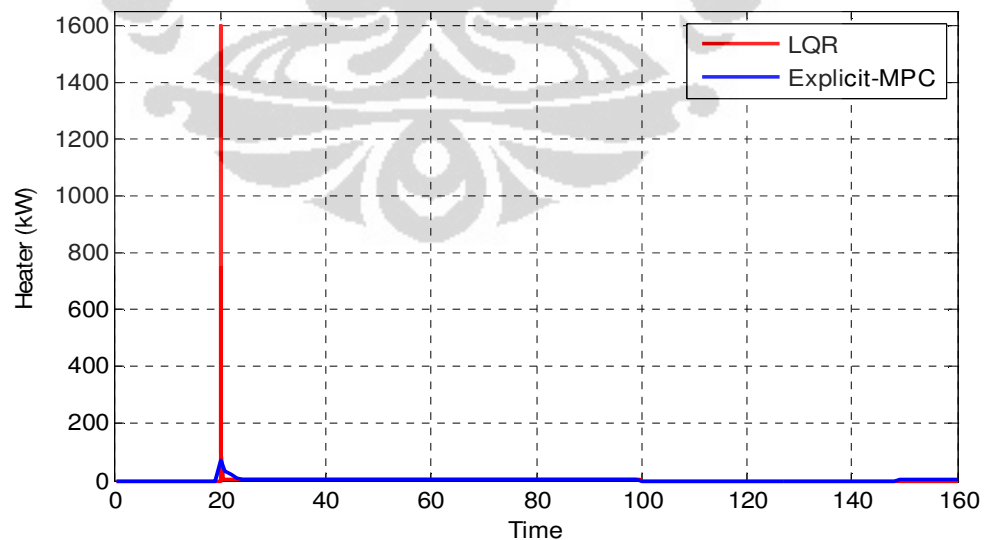
Gambar 4.4. Keluaran volume antara *Explicit MPC* dan LQR dengan saturasi input pada tracking reference

Kendali LQR hanya dapat mengikuti perubahan setpoint tekanan pada saat naik, tidak dapat mengikuti setpoint saat tekanan turun. Kendali *Explicit-MPC* mampu mengikuti perubahan setpoint tekanan pada saat naik dan turun. Gambar 4.3 menunjukkan kendali *Explicit-MPC* dapat mengikuti tracking pada saat tekanan naik dan turun sebesar dua bar sedangkan volume air naik dari  $27.5\text{m}^3$  menjadi  $35\text{m}^3$  masih dibawah batas atas volume  $37.5\text{m}^3$ . Spray bekerja

dengan menyiramkan air sampai batas atas sebesar 36 kg/s untuk menurunkan tekanan sebesar dua bar, sehingga volume air naik cukup besar. Untuk menaikkan tekanan sebesar dua bar maka heater dinyalakan. Pada kendali *LQR* heater dinaikkan sampai 1500 kW sedangkan dengan *Explicit-MPC* sinyal heater naik sampai 70 kW kemudian turun, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.



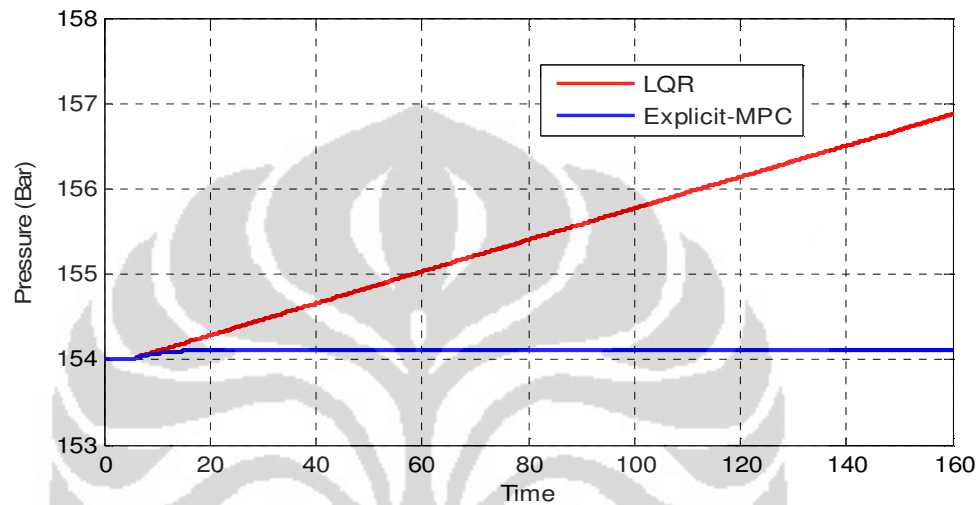
Gambar 4.5. Sinyal kendali spray antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking



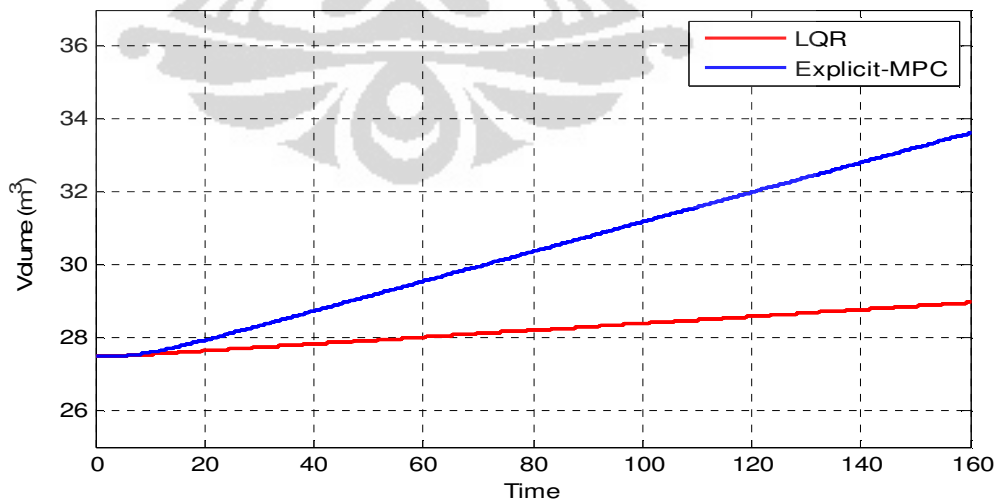
Gambar 4.6. Sinyal kendali heater antara Explicit MPC dan LQR dengan saturasi input pada tracking



surge aliran pendingin masuk kedalam pressurizer mengakibatkan tekanan naik. Kendali *LQR* tidak dapat menjaga tekanan konstan pada titik operasi 154 bar, tekanan naik sampai terus sampai 157 bar. Kendali *Explicit-MPC* dapat menjaga tekanan tetap konstan disekitar titik operasi 154 bar, tekanan naik 0.02 bar. Besarnya error pada keadaan steady 0.02%. Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan tekanan antara *LQR* saturasi masukan dengan *Explicit-MPC*

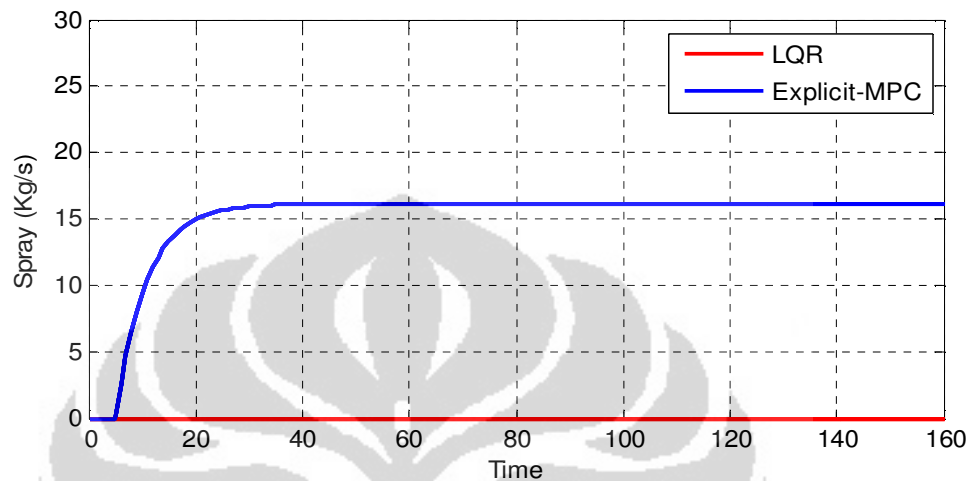


Gambar 4.8. Keluaran tekanan kendali *Explicit-MP* dan *LQR* dengan saturasi input dengan gangguan insurge sebesar 4 kg/s



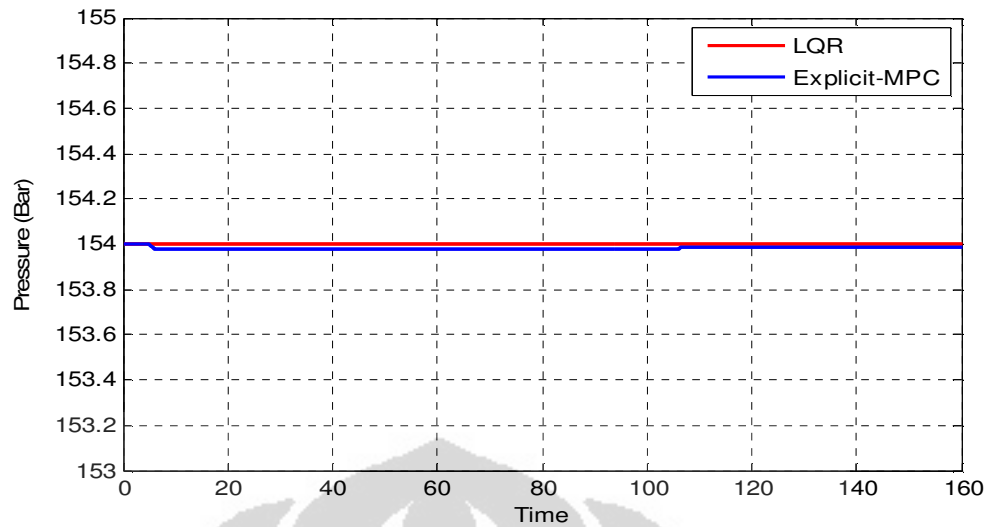
Gambar 4.9. Keluaran volume air kendali *Explicit-MP* dan *LQR* dengan saturasi input dengan gangguan insurge sebesar 4 kg/s

Volume air naik dengan gangguan *insurge* step 4 kg/s ditunjukkan Gambar 4.9. Penambahan volume lebih besar pada *Explicit-MPC* dibandingkan dengan kendali *LQR*, ini terjadi untuk menjaga tetap konstan maka sinyal spray disemprotkan sebesar 15 kg/s seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10



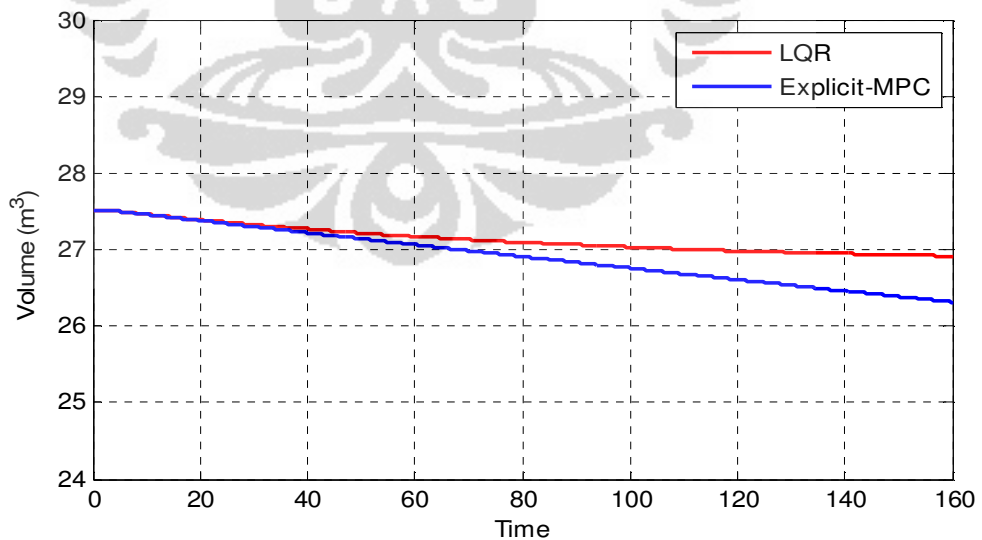
Gambar 4.10. Sinyal kendali Spray dengan gangguan *insurge* sebesar 4 kg/s

Percobaan berikutnya dengan surge keluar (*outsurge*) step - 4 kg/s yang mengakibatkan tekanan didalam pressurizer turun. Ini terjadi bila laju aliran pendingin mengalami penurunan sehingga tekanan sistem turun. Untuk menanggulangi penurunan tekanan maka heater dijalankan sehingga tekanan naik. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa *LQR* dan *Explicit-MPC* dapat menjaga tekanan operasi tetap konstan pada 154 bar dari gangguan *outsurge* sebesar 4 kg/s.

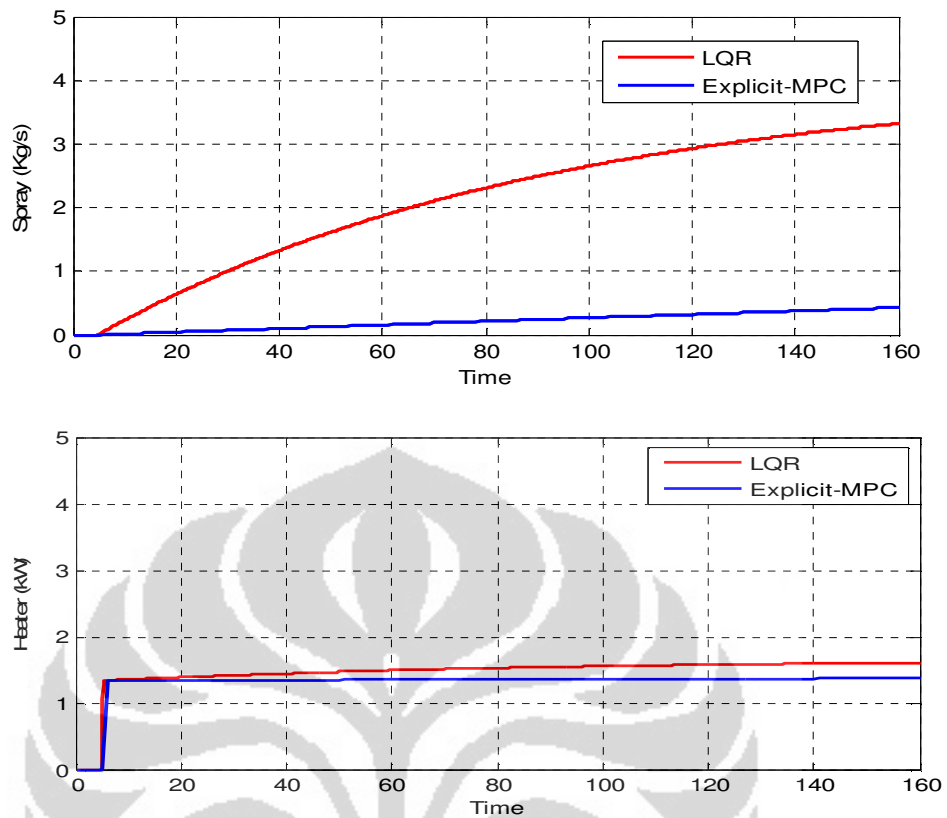


Gambar 4.11. Keluaran tekanan kendali *Explicit-MP* dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar  $-4 \text{ kg/s}$

Sedangkan dampak dari bekerjanya heater akan menurunkan volume air karena akan lebih banyak uap yang terbentuk. Gambar 4.12 menunjukkan perubahan volume air dari kendali *LQR* dan *Explicit-MPC*

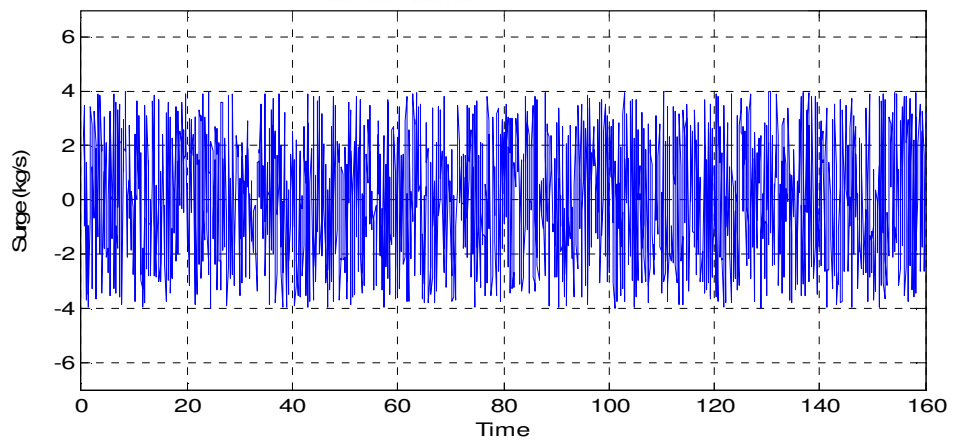


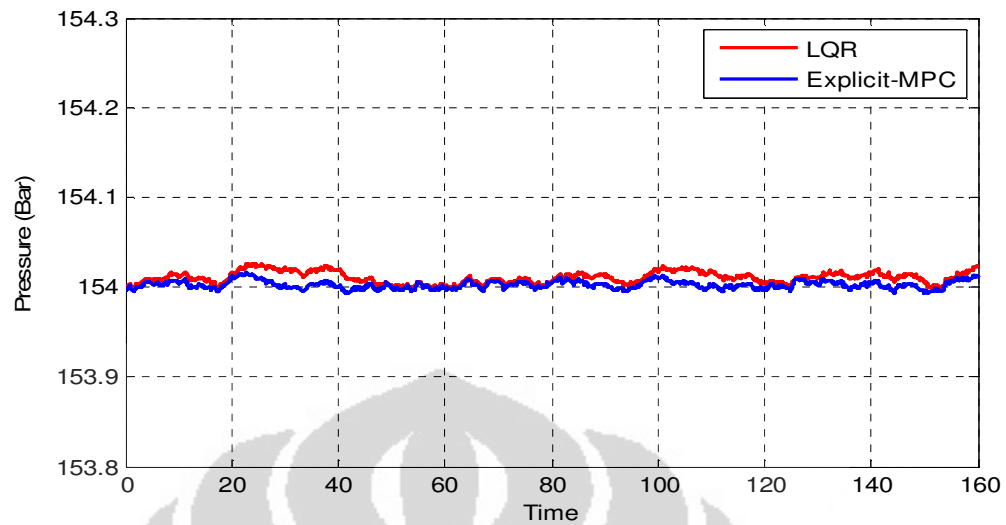
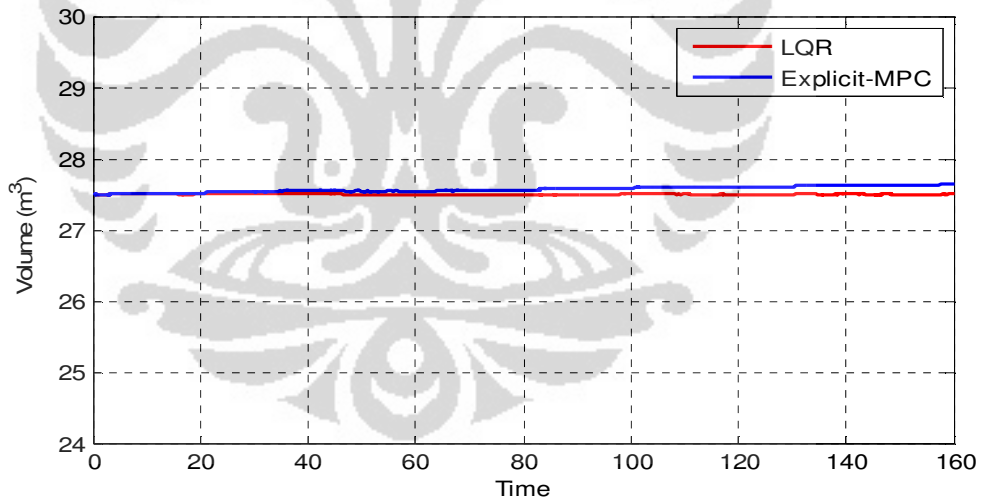
Gambar 4.12. Keluaran volume air kendali *Explicit-MP* dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar  $-4 \text{ kg/s}$



Gambar 4.13. Sinyal kendali spray dan heater untuk Explicit-MP dan LQR dengan saturasi input dengan gangguan outsurge sebesar  $-4$  kg/s

Simulasi selanjutnya memberi sinyal surge gangguan berbentuk random uniform antara  $-4$  kg/s sampai  $4$  kg/s seperti ditunjukkan pada gambar 4.14

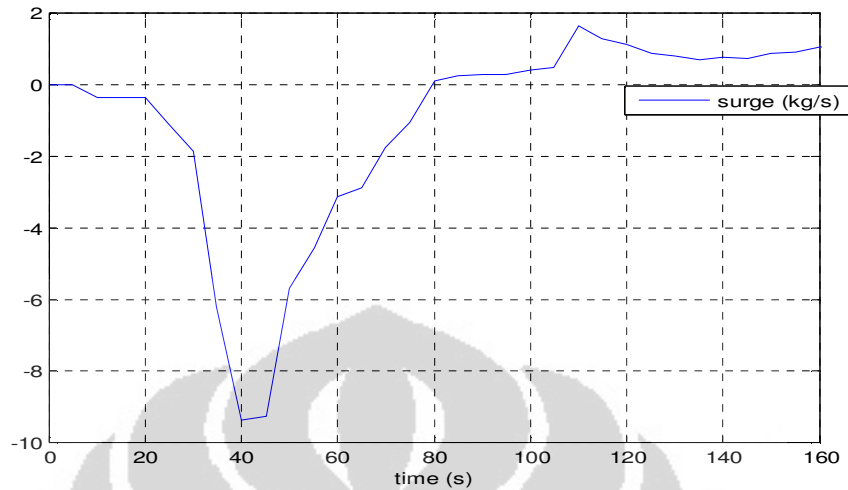


Gambar 4.14 Sinyal gangguan surge uniform  $-4\text{s/d } 4\text{ kg/s}$ Gambar 4.15. Keluaran tekanan kendali *Explicit-MP* dan *LQR* dengan saturasi input dengan gangguan surge random uniform  $-4\text{ s/d } 4\text{ kg/s}$ Gambar 4.16. Keluaran level air kendali *Explicit-MP* dan *LQR* dengan saturasi input dengan gangguan surge random uniform  $-4\text{ s/d } 4\text{ kg/s}$ 

Gambar 4.15 menunjukkan tekanan keluaran *Explicit-MPC* lebih dekat pada titik operasi 154 bar dibandingkan dengan kendali *LQR*. *Explicit-MPC* lebih baik daripada kendali *LQR* terhadap gangguan surge random uniform  $-4$  sampai  $4\text{ kg/s}$

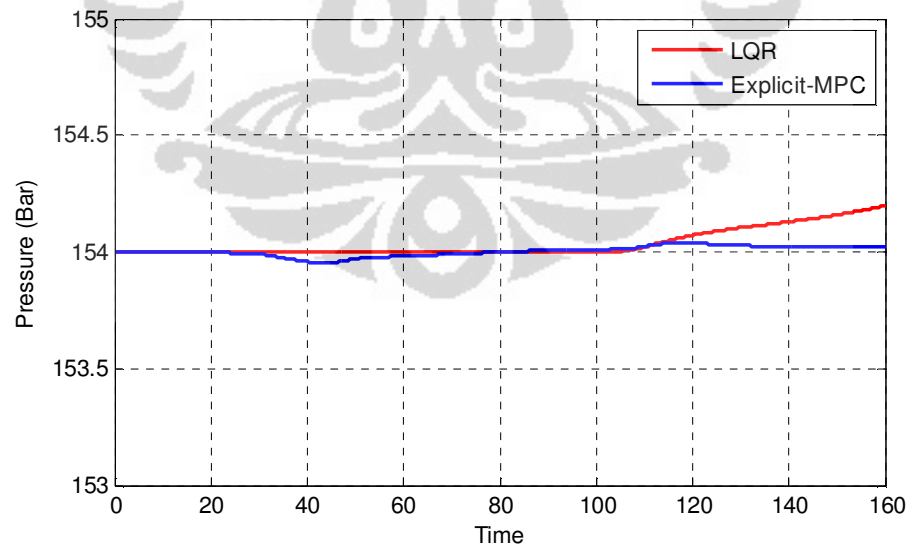


Pengujian berikutnya dilakukan dengan menggunakan gangguan surge data operasi PWR [19] seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17

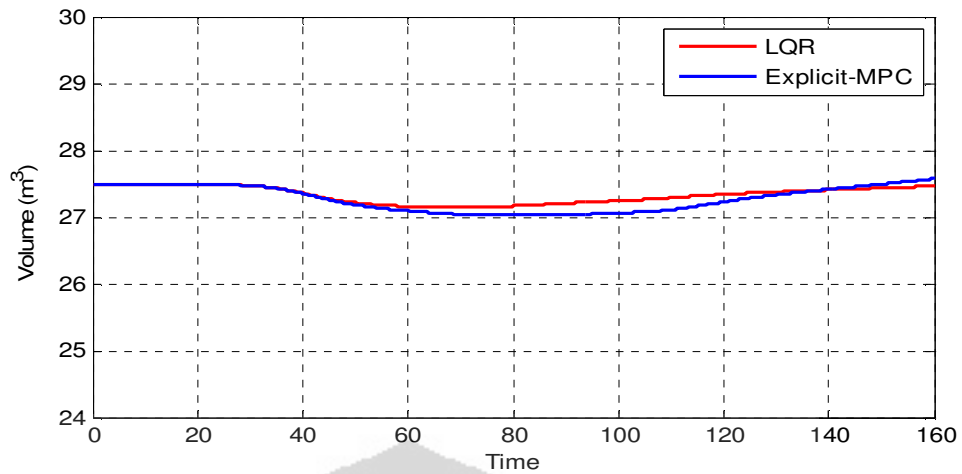


Gambar 4.17 Sinyal Gangguan surge outsurge dan insurge

Kendali *Explicit-MPC* dapat menjaga tekanan pressurizer tetap konstan pada titik operasi 154 bar, sedangkan keluaran kendali *LQR* menjadi tidak stabil seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18.

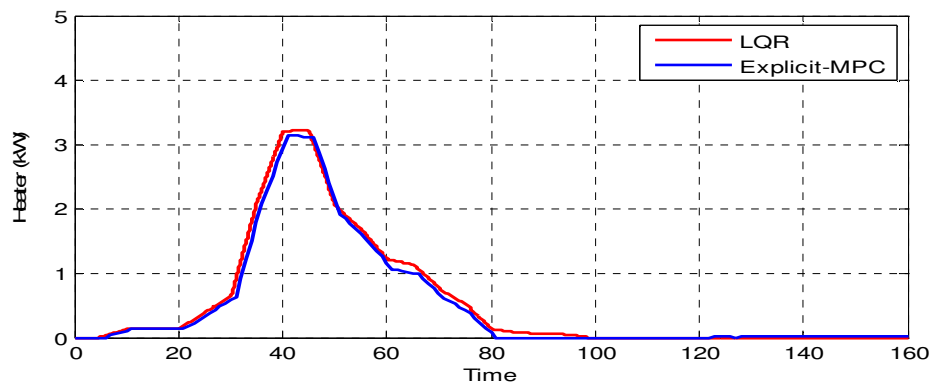
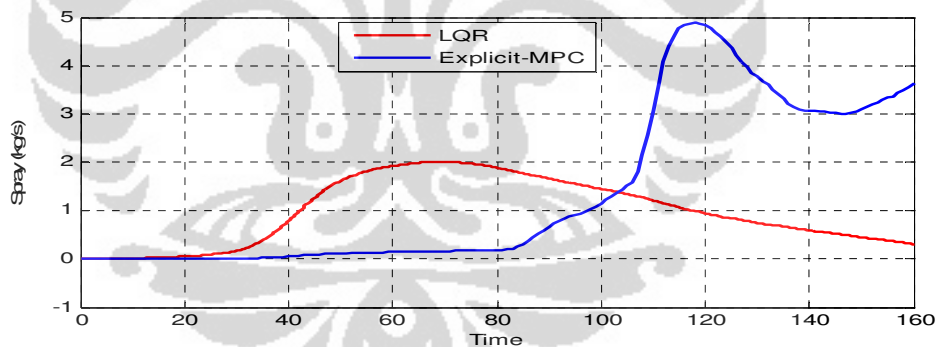


Gambar 4.18. Keluaran tekanan kendali *Explicit-MP* dan LQR dengan saturasi input



Gambar 4.19. Keluaran volume kendali *Explicit-MP* dan LQR dengan saturasi input

Sedangkan volume air mengalami perubahan tetapi masih disekitar  $27.5 \text{ m}^3$  masih dalam batas yang aman seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19. Signal kendali heater dan spray pada *Explicit-MPC* bekerja saling bergantian untuk menjaga tekanan tetap konstan 154 bar, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20



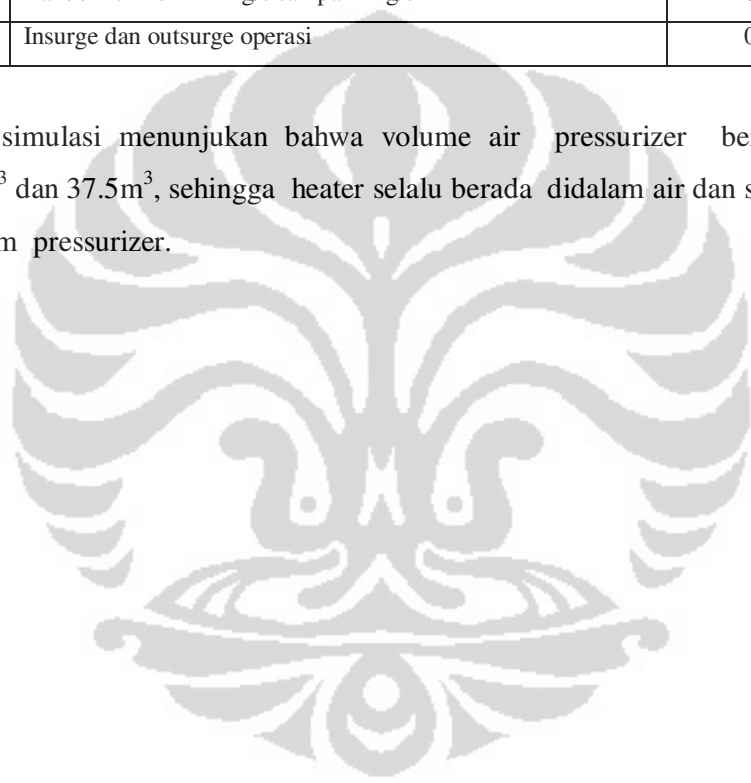
Gambar 4.20. Keluaran sinyal spray dan heater kendali *Explicit-MP* dan LQR saturasi input

Hasil simulasi desain kendali *LQR* dan *Explicit-MPC* menunjukkan bahwa kendali *Explicit-MPC* menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik daripada *LQR*. Besarnya error steady kendali *Explicit-MPC* dengan ada gangguan surge dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Besarnya error steady kendali *Explicit-MPC* dengan gangguan surge

No.	Jenis surge gangguan	Porsentase Error
1	Insurge sebesar -4 kg/s	0.012%
2	Oursurge sebesar 4 kg/s	0.057%
3	Random uniform -4 kg/s sampai 4 kg/s	0.008%
4	Insurge dan outsurge operasi	0.008%

Hasil simulasi menunjukkan bahwa volume air pressurizer berada diantara  $17.5\text{m}^3$  dan  $37.5\text{m}^3$ , sehingga heater selalu berada didalam air dan selalu ada uap didalam pressurizer.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil desain kendali dengan menggunakan *LQR* dan *Explicit-MPC* untuk pressurizer disimpulkan

1. Kendali *LQR* dengan saturasi input hanya dapat digunakan jika tekanan pressurizer dinaikkan dan tidak mampu jika tekanan diturunkan dari setpointnya.
2. Kendali *Explicit-MPC* dapat digunakan mengendalikan pressurizer untuk tracking reference dengan perubahan tekanan sebesar dua bar
  - Tekanan naik mengikuti perubahan setpoint bentuk step dari 154 ke 156 bar, mempunyai waktu steady sebesar 4 detik dan tidak ada overshoot
  - Tekanan turun mengikuti perubahan setpoint bentuk step dari 154 ke 156 bar, waktu steady sebesar 44 detik
3. Kendali *Explicit-MPC* mampu mempertahankan tekanan tetap konstan pada 154 bar dari gangguan beberapa surge.
  - Gangguan surge -4 kg/s, didapat error 0.012 % .
  - Gangguan surge 4 kg/s, didapat error 0.057 % .
  - Gangguan surge random uniform -4 s/d 4 kg/s, didapat error 0.008%
  - Gangguan insurge dan outsurge dari data operasi PWR didapat error sebesar 0.008%.

4. Kendali *Explicit-MPC* dapat digunakan sebagai kendali alternative dalam pengendalian pressurizer

## 5.2. Saran

Selanjutnya akan dilakukan pengembangan *Explicit-MPC* untuk sistem tertanam (*embedded system*) dengan menggunakan mikroprocessor yang lebih sederhana untuk pengendalian pressurizer.



## DAFTAR REFERENSI

- [1] M A Jin, L.I.Y., HUANG Yu, WANG Bingshu, CHAN Afang, *Mechanism Model and Simulation of Pressurizer in the Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant*. Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, 2011, Yantai, China, 2011: p. 6.
- [2] Istvan Varga, G.S., Peter Gaspar, Jozef Bokor, *Implementation of Dynamic Inversion-Based Control of a Pressurizer at the Paks NPP*. 17 th IEEE International Conference on Control Applications Part 2008 IEEE Multi conference on Systems and Control San Antonio, Texas, USA September 3-5, 2008 2008: p. 6.
- [3] Jinming Yi, J.Y., Yang Xue, Xuhong Yang, Hong Qian, *Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on CMAC and PID Controller*. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009: p. 4
- [4] R. Zargami, F.J., N.Mostoufi, R.Sotudeh, K.sepanloo, F.Dastjerdi, *The Dynamic Modeling of the Pressurizer Surge Tank Transient in Light Water Reactor Nuclear Power Plant*. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering 2005. 29, No B5: p. 12.
- [5] P.Tamas, I Varga, G. Szederkenyi, J Bokor, “ *Robust Model Predictive Control with State Estimation For Industrial Pressurizer System*”, Hungarian Journal of Industrial Chemistry Vol 33(1-2) pp89-96
- [6] Westinghouse Electric Company LLC, *Manual operation Presuure Water Reactor AP1000, 2005*
- [7] Todreas, Neil E., Kazimi, M. S., *Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals*, Taylor & Francis Group LLC, New York, 1990.
- [8] Magnus Holmgren., *XSteam For Matlab*, [www.x-eng.com](http://www.x-eng.com), 2006
- [9] Thomas Meikle V., Katie Swab., *Design Basic Document Pressurizer (PPZ) and Plant Control System(PCS) PANTHER Simulator*, May 2, 2011
- [10] N.Pistikopoulos, “Linear Model Predictive Control Via Multiparametric Programming,” Wiley-CVH 2007

- [11] Johansen, T. a., Petersen, I., & Slupphaug, O. (n.d.). On explicit suboptimal LQR with state and input constraints. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.00CH37187)*, 1, 662-667. Ieee. doi:10.1109/CDC.2000.912842
- [12] Bemporad, A., Morari, M., Dua, V., & Pistikopoulos, E. N. (2002). The explicit linear quadratic regulator for constrained systems  $\mathcal{E}$ , 38.
- [13] Tøndel, P., Johansen, T. A., & Bemporad, A. (n.d.). An Algorithm for Multi-Parametric Quadratic Programming and Explicit MPC Solutions, (3).
- [14] Dua, V, PistikopoulosEN, *Ann. Oper, Res.* 99(1999) p.123
- [15] Dua, V, Pistikopoulos,EN, *Ind.Eng ChemE76*(1998) p.3976
- [16] Westinghouse Electric Company LLC, *AP1000 Design Contro Document, Revision 16, Section 5, "Reactor Coolant System and Connected Systems,"*
- [17] Sang-Nyung Kim, P.G., *PWR PressurizerModelling* . Nuclear Engineering and Design, 1987. 102: p. 11.Takasuo, E.,
- [18] Triyanto, Joko, "*Pemodelan dan SimulasiPressurizer satu fase pada PLTN tipe PWR*, 2012 Seminar